

보건분야·연구자료

연구 원 99-39-109

H-RD-I-99-39-109

국소배기장치 효율향상에 관한 연구

도료제조업계를 중심으로



한국산업안전공단
사업아저버거여구의

제 출 문

한국산업안전공단 이사장 귀하

본 보고서를 1998년도 산업안전보건연구원의 연구사업중
“국소배기장치 효율향상에 관한 연구”에 대한 최종보고서로
제출합니다.

1998. 12.

주관연구부서 : 산업안전보건연구원 산업보건위생연구실

연구책임자 : 책임연구원 심 광 진

공동연구자 : 기술직 4급 박 승 현

목 차

I. 서 론

- 1. 연구배경 및 목적1
- 2. 기존의 연구2

II. 연구대상 및 방법

- 1. 사업장 실태조사4
- 2. 실험6
- 3. 수치해석9

III. 연구결과 및 고찰

- 1. 사업장 실태조사 결과11
- 2. 실험결과와 수치해석결과 발표24

IV. 결 론41

참고문헌

I. 서 론

1. 연구배경 및 목적

산업환기는 작업자의 직업병예방을 위하여 필수 불가결한 요소로서 그 중요성은 산업위생분야에 종사하는 사람은 누구나 잘 알고 있는 사실일 것이다. 우리나라는 산업환기분야의 역사가 일천하여, 현재 여러 분야에서 나름대로 열심히 하고 있지만 앞으로 연구해야 할 분야는 무한하다고 생각한다. 특히 IMF시대에 산업환기장치의 효율성은 최소의 풍량으로 최대의 작업자 건강보호효과를 얻어야 함에도 불구하고 비효율적인 장치가 많아 경제적인 손실이 매우 크다고 할 수 있다.

산업안전공단에서 1991년도에 전국의 제조업체 748 개소를 대상으로 국소배기장치 설치실태를 조사한 결과, 후드의 유해물질 포집효율을 나타내는 제어풍속(Capture Velocity)이 전체의 54.2%가 기준치를 만족하였으나, 기준치를 만족하지 못하여 유해물질의 배기가 원활하지 못한 경우가 45.8%로써 전체 후드의 약 절반이 작업자 건강보호를 위한 제 기능을 발휘하지 못하는 것으로 나타났다(한국산업안전공단, 1993).

이에 대한 원인으로서는 설계당시 적정 배풍량을 고려하지 않은 경우가 대부분이었고, 설계가 적절하게 되었다 하더라도 댐퍼조정이 적절히 이루어지지 않거나 닥트파손 등으로 인한 누기, 공기정화장치의 관리불량으로 인한 압력손실 증가 등 사후관리를 제대로 하지 않아 일어나는 경우가 많은 것으로 조사되었다. 또한, 후드설계나 설치시 작업형태나 작업방법, 가공물의 이동경로 등을 정밀조사하지 않고 설계 및 설치함으로써 작업이 곤란하여 작업자가 임의로 철거한 경우도 있으며, 작업자 교육이 제대로 이루어지지 않아 작업자가 사용을 기피, 가동치 않는 경우도 있었다. 이와 같이, 현장에서 산업환기에 대해 수많은 문제점들이 제기되고 있어, 이를 해결하기 위해서 향후 보다 많은 사람들이 산업환기분야 연구에 참여해야 할 것이다.

생산현장에는 비효율적인 산업환기장치가 너무나 많고, 개선의 필요성은 느끼지만 어떻게 하면 경제적으로 개선할 것인가에 대한 명확한 해답을 얻기 힘든 경우가 많다. 산업환기장치의 효율을 개선하기 위해서는 후드의 형태, 크기 및 배풍량이 적절해야 하고, 다음으로 어떻게 배풍량을 여러 개의 후드에 분배시키느냐가 관건이다.

따라서, 작업장내의 작업환경개선에 대한 대내외적 요구가 점차 고조됨에 따라, 작업환경개선을 위해서 가장 효과적인 수단인 국소배기장치의 효율향상방안에 대한 연구가 절실하게 요망되어, 본 연구는 유기용제 사용업체중 특히 도료제조업체를 중심으로, 현장실태조사 및 국소배기후드에 대한 실험결과와 수치해석결과에 대한 비교연구를 통하여, 이를 현장에 활용할 수 있도록 작업환경관리방안 제시 및 후드설계시 수치해석방법의 적용방안을 강구하고자 한다.

2. 기존의 연구

국소배기에 이용되는 후드의 종류는 다종다양하며, 그 형식은 개구의 형상, 설치위치, 배기방향 등에 따라 몇 종류의 명칭으로 나뉘어져 있다. 후드의 흡입공기의 유동특성은 때에 따라 매우 복잡한 경우가 있으나, 유동특성을 고려하는 경우 기본이 되는 것은 원형, 정방형 및 장방형 개구 등 지극히 간단한 개구로 생각할 수 있다.

원형, 정방형 및 장방형 개구에 있어서 기류분포에 관해서는 J.M. Dalla Valle(1932), L.Silverman(1942), B.Fletcher(1977), R.P.Garrison(1981) 등의 보고가 있으며, 개구부 및 입구내부(Throat)기류의 유동특성, 즉 축류현상 및 압력손실특성에 대한 상세한 보고는 최근에 T.Iwasaki 등(1989, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997)에 의해 계속 이루어지고 있다.

국내의 국소배기후드에 관한 연구로는 윤 등(1991)에 의한 후드의 충만효과에 관한 연구, 김(1993)에 의한 외부식 다단형 슬로트후드의 효율향상에 관한 연구, 심(1995)에 의한 정방형개구의 테이퍼후드에 있어서 관내의 압력손실특성에 관한 연구 및 한(1998)에 의한 일부 탈지세척 및 도금공정 국소배기장치의 성능점검과 개선방안에 관한 연구보고가 있다. 이외에, 국소배기장치 설계 소프트웨어 개발 및 최근 실내기류해석분야(이정주, 1994. 이정재, 1998)에 새로이 도입된 전산유체역학(CFD;Computational Fluid Dynamics)을 산업환기분야에 적용하기 위한 연구로 김 등(1997)에 의한 VSDS(Ventilation System Design Software)의 개발과 하 등(1998)에 의한 산업환기공학에 대한 전산유체역학의 응용가능성에 관한 연구보고가 있다.

국내에서 전산유체역학을 산업환기에 적용한 예는 매우 드물다. 2차원 축대칭 모델을 사용하여 원통형 후드입구 유동을 예측한 김(1996), 2차원 푸쉬-풀후드

에서 푸쉬노즐 유속에 따른 기류를 예측한 조(1995)의 연구 등이 있었고, 최근에는 김 등(1997)이 방해물체 주위에서의 기류와 오염물질의 거동을 예측한 연구 등이 있을 뿐, 현장에 적용한 예는 거의 없는 실정이다. 하지만 외국에서는 후드 입구 기류를 예측하는 기초적인 연구 뿐만 아니라 현장의 문제들을 전산유체역학을 통해 해결하는 연구도 활발하게 진행되고 있다. 가장 기초적인 원통형 및 장방형 후드에 대한 수치해석 연구들은 다음과 같다.

Garrison 등(1988)은 FEM(Finite Element Method)을 이용하여 후드개구면의 위치와 개구면 모양을 다르게 하여 후드입구 유동장을 해석하였다. Flynn은 Potential flow solution(1985), MAXIM코드(1988), BIEM(Boundary Integral Equation Method)(1989)을 이용하여 후드입구 유동장을 해석하였다. 또 후드입구에서 방해기류(Cross-draft)의 영향을 수치해석으로 예측하였다(1988). Jansson(1988)은 원통형과 장방형 후드에 대해 수치해석하여 Dalla Valle의 실험결과 및 기타 수치해석결과와 비교하여 만족한 결과를 얻었다. 또 Ilpo Kulmala는 상용 전산유체 프로그램인 FLUENT를 이용하여 후드입구 유동장을 해석하였다(1993, 1995).

표면처리조에 대해서는, R. Braconnier(1991)가 측방형 슬롯의 유체유동과 오염물질의 농도를 수치해석으로 예측한 다음 실험을 통해 결과를 검증하였다. M. Robinson과 D. B. Ingham(1996)은 푸쉬-풀후드의 수치해석에 있어 계산시간을 줄일 수 있는 방법에 대해 연구하였고, Heinsohn(1991)은 급·배기 유속을 변화시키면서 3 가지 모델을 설정하여 푸쉬-풀후드에 대해 수치해석하였다.

원통형 후드와 장방형 후드 그리고 푸쉬-풀후드의 입구기류에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있지만 측방형 슬롯후드에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다. 특히 측방형 슬롯후드에 관한 수치해석적 연구의 예는 거의 없는 실정이다.

II. 연구대상 및 방법

1. 사업장 실태조사

가. 조사대상

우리 나라의 도료제조업체는 전국적으로 약 100여 개소가 있는 것으로 알려져 있다. 근로자수 5인 이상의 업체를 대상으로 조사한 '89 광공업통계조사보고서(1991)에 의하면, 우리 나라의 도료제조업체수는 113개소, 근로자수는 8,000여명에 이른다. 이중 근로자수 5~99명인 업체수는 95개소로 전체의 84%, 100~300명인 업체수는 11%, 300명 이상의 대규모업체는 약 5%이다. 대규모업체에 종사하는 근로자수는 약 36,000 여명으로 전체 근로자수의 약 45%이다.

본 연구에서는 표 2-1에서와 같이 대규모업체와 중소기업체 각 3개소를 선정하여 작업환경실태를 조사하였다.

표 2-1. 작업환경실태조사 대상업체 현황

업 체 명	근 로 자 수	비 고
KC 사	670명	자동차용, 건축용 내외장도료 등 제조
S.H 사	350명	건축용, 선박용, 공업용 도료 등 제조
D.H 사	340명	건축용, 자동차용, 가전금속용 도료 제조
S.Y 사	100명	일반용 도료 제조
D.Y 사	90명	일반용 도료 제조
IS 사	65명	특수도료, 인쇄잉크 제조

나. 작업환경측정 및 분석방법

방향족 탄화수소화합물을 중심으로 사업장에서 사용중인 유기용제의 노출평가를 위한 작업환경측정·분석은 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 Method 1501을 참고하였다. 활성탄관을 포집재로 사용하여 0.05~0.2 Lpm의 유량으로 10~30L의 공기를 채취하였으며, 개인 및 지역시료를 채취하였다. 포집시료는 CS₂ 1mL로 탈착하여 GC로 분석하였고, 사업장에서 사용중인 혼합유기용제의 성분확인을 위해 Bulk시료를 채취하여 GC-MSD로 분석하였으며, 분석조건은 다음 표 2-2와 같다.

표 2-2. 시료의 정성 및 정량분석 조건

분석조건	G.C	GC-MSD	비고
기기모델	HP 5890	HP 5971	
Column (길이*내경)	HP1 25m * 0.32mm, HP-FFAP 25m * 0.2mm	HP1 50m * 0.2mm	
오븐 온도(℃)	55~80	70~150	등온 또는 승온 분석
주입기 온도(℃)	230	250	
검출기 온도(℃)	250	300 (Interface 온도)	
성분검색	-	Wiley 138 Library	

다. 자료분석

사업장별, 공정별, 물질별 측정자료의 분포, 비교평가, 대수정규분포 등에 대한 분석을 위해 Sigma Plot(Version 3.02)과 SAS(Version 6.02)를 이용하였다.

라. 환기시설 성능평가

조사대상 사업장의 환기시설에 대한 성능평가를 위해서 발연관 및 열선풍속계(Anemometer, 모델 6631-PAM, Kanomax사)를 이용하여 제어풍속을 측정하였다.

2. 실험

가. 실험장치

그림 2-1은 실험장치의 개략을 나타낸 것이다.

풍량 $Q=55\text{m}^3/\text{min}$, 정압 $SP=450\text{mmAq}$ 인 TURBO-FAN ⑮의 흡입구에 Pulseair식 집진기 ⑭와 정밀풍량조절 Slide Damper ⑦, FAN의 서지(변동)방지를 위한 Bypass관 ⑫와 Bypass Butterfly Damper ⑪, 내경 261mm, 길이 1,800mm의 유량측정용직관 및 관내경 261mm의 정밀정류격자 ⑤를 직렬로 연결하고, 그 앞에 내경 261mm, 길이 1,800mm의 직관과 내경 261mm*210mm, 길이 300mm의 Taper관, 내경 210mm, 길이 420mm의 엘보우 3개와 내경 210mm, 길이 929mm의 직관을 연결한 후, 그 선단에 복합후드로써 내각이 45° 인 Take-off와 폴리넵 박스, 6종류의 슬로트후드를 교대로 접속하여 후드전면부의 유동특성에 대해서 실험하였다.

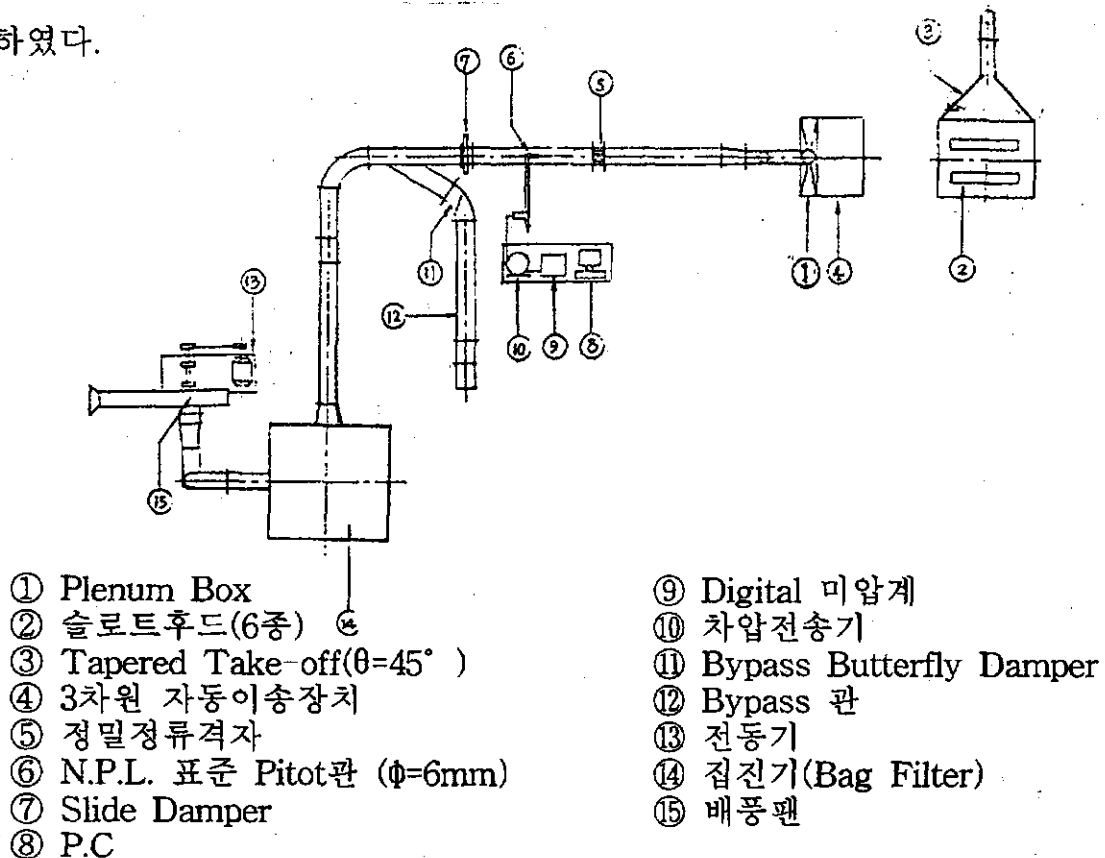


그림 2-1. 실험장치도

그리고, 실험중에는 난기류의 영향을 최소화하기 위해서, 후드면으로부터 가장 먼 곳에 실내 부압방지장치를 설치하여, HEPA Filter를 통하여 배풍량과 같은 양의 신선한 외부공기를 실내로 유입시켰다.

그림 2-2는 실험장치의 전경사진이며, 표 2-3은 실험장치의 주요구성부품 내역을 정리한 것이다.

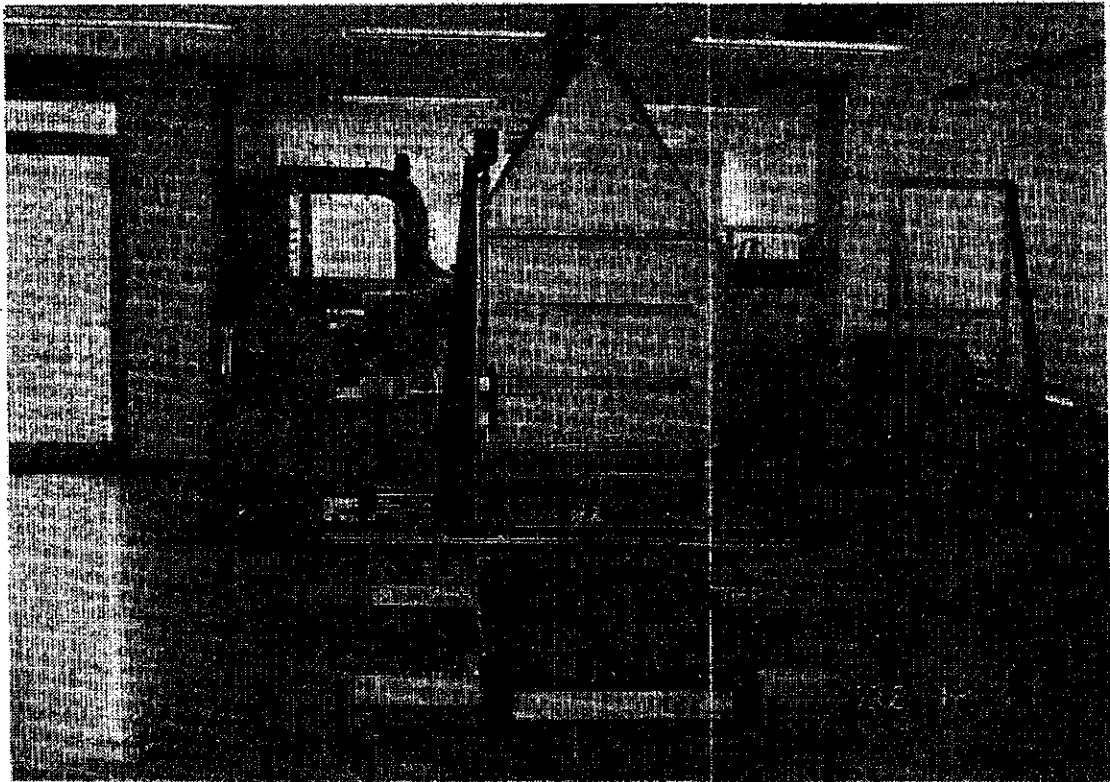


그림 2-2. 실험장치 전경

표 2-1. 실험장치의 주요구성부품 내역

구 분	규 격	비 고
슬 로 트 후 드	1000×800, SUS 1.5t	
Tapered Take-off	$\theta = 45^\circ$, SUS 3.0t	
3차원 자동이송장치	1500×1000×1000(X*Y*Z)	
플 리 넘 박 스	1000×800×210(W*H*D)	
NPL표준Pitot관	$\phi = 6\text{mm}$, L=1000mm	
P. C	PC-9821 Ap2	일본 NEC
Digital 미압계	0~400 mmAq	일본과학공업(주)
차 압 전 송 기	1151 DP형	일본 大倉전기(주)
집진기(Bag Filter)	여과면적 55.3m ² , 내압 400mmAq	일본 HOSOKAWA
TURBO FAN	Q=55m ³ /min, SP=450mmAq	일본 MITSUYA
전 동 기	3 ϕ 220V, 7.5kw, 인버터식	일본 TOSHIBA
미 풍 속 계	IHW-100	일본과학공업(주)
부 압 방 지 장 치	Q=55m ³ /min, SP=60mmAq, 3 ϕ 220V, 1.5kw, 인버터식	

나. 관내 평균속도압 측정

그림 2-1. 실험장치도의 측정용직관에 연결되어 있는 정밀정류격자로부터 하류측 3.4d의 위치에 있어서 동심원 등면적법(n=5) (ACGIH, 1995; 日本中央労働災害防止協會, 1983)에 의해 10점을 측정점으로 하고, 정밀 TRAVERSE 장치를 이용하여 NPL(National Physical Laboratory)형 표준 Pitot관(직경 6mm)을 TRAVERSE해 가면서 각 측정점의 정압 및 동압을 Digital 미압계로 측정했다.

측정에 의해 얻어진 관내 평균속도압 P_v , 중력가속도 g 및 공기비중량 γ 로부터 $V = \{(2g/\gamma)P_v\}^{1/2}$ 의 관계를 이용하여 관내 평균속도 V 및 V 와 관로단면적 ($A = \pi d^2/4$)을 곱하여 유량 Q 를 구하였다.

3. 수치해석

가. 일반 지배방정식(Basic Governing Equations)

비압축성 유동 및 정상상태라는 가정하에서 난류유동에 대한 일반 지배방정식은 다음과 같다. (CFD-ACE, 1998)

1) 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

2) 난류운동량방정식

난류모델은 난류 점성계수(μ_t) 취급방법에 따라 여러 가지로 나눌 수 있는데, CFD-ACE(Ver. 4.0)에서는 1974년 Launder과 Spalding에 의해 제시된 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용한다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon}$$

난류 점성계수를 구하기 위해서 필요한 난류에너지(k)와 소산률(ϵ)은 다음과 같이 구한다.

난류에너지(k) 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \epsilon \quad (3)$$

소산률(ϵ) 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) - C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} G - C_{\epsilon_2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

여기서, G 는 난류 생성항으로 다음 식과 같이 표시된다.

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

난류 운동에너지를 풀기 위해 사용되는 실험상수는 표 2-4와 같다.

Table 2-4. Values of the constants in the $k-\varepsilon$ model

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

3) 벽함수 (Wall Function)

표준 $k-\varepsilon$ 모델은 유동 Re가 매우 크다는 가정하에 이루어졌다. 하지만 벽면 근처에서 속도구배가 매우 크고, 벽면에서 층류가 흐르기 때문에 표준 $k-\varepsilon$ 을 적용하기 위해서는 벽함수를 도입해야 한다. 벽면 근처에서 대수 벽함수는 다음 식과 같이 표현된다.

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(Ey^+) \quad : y^+ > 11.63 \quad (5)$$

$$\text{여기서, } u^+ = U/u_\tau, \quad u_\tau = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{1/2}, \quad y^+ = \frac{\rho y u_\tau}{\mu}$$

k 는 Karman상수이고, E 는 조도계수이다. 실험에 의해 상수는 각각 $E=9.0$ (동력학적으로 매끄러운 관에 대해), $k=0.4$ 로 결정되어 있다.

벽면에 대한 난류운동에너지(k)와 난류소산률(ε)은 식(6)과 식(7)로 구할 수 있다.

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (6)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{ky} \quad (7)$$

나. 수치해석방법

CFD-ACE(Ver. 4.0)에서는 이산화방법으로 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하고, 연속방정식과 운동량방정식을 조합시키는 방법으로 SIMPLE-C(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent) 알고리즘을 사용하였다.

이 알고리즘은 Patankar에 의해 제안된 SIMPLE 알고리즘에 압력보정식(Pressure-Correction Equation)을 일부 수정한 알고리즘이다(Patankar, 1980; 이재현, 1997).

III. 연구결과 및 고찰

1. 사업장 실태조사 결과

가. 대상업체별 작업환경측정 결과

사업장 실태조사시 도료제조업체의 취급물질은 톨루엔, 크실렌 등 방향족 물질과 MEK, MIBK 등 케톤계 물질, 에틸아세테이트, 부틸아세테이트 등 아세테이트계 물질이 주를 이루고 있었다. 따라서 업체별 작업환경측정결과를 다음과 같이 방향족 화합물, 케톤계 화합물, 아세테이트계 화합물로 구분하였다. SH사, KC사, DH사는 근로자수 300인 이상의 대규모업체이며, DY사, SY사, IS사는 중소기업이다.

표 3-1은 도료제조업체에 대한 작업환경측정결과중에서 방향족 화합물에 대한 측정결과를 비교한 것이다. 방향족 화합물의 노출농도는 전체노출 유기용제의 60~90%를 차지하며 도료제조업체의 대표적인 물질이라 할 수 있다. 측정결과 업체별 평균 노출수준은 전반적으로 노출기준에 비해 1/10 정도의 수준이었다. 물질별로 보면 Toluene 0.46~15.94 ppm, Ethylbenzene 0.22~1.81 ppm, Xylene 1.31~5.45 ppm의 수준이었다. 업체의 평균 노출수준은 낮다고 할 수 있으나 일부 작업자의 경우 노출기준을 훨씬 초과하는 경우도 있다. 이는 KC사의 신너포장 작업자와 도료 포장공정에 근무하는 작업자에 대한 개인시료 채취결과로 Toluene 농도가 노출기준을 초과하고 있었다. 두 작업자 모두 Toluene과 Xylene이 주요 신너인 물질을 취급하고 있었으며 환기시설이 설치되지 않은 상태에서 작업하고 있었고, 작업장내에서 용기 세척작업을 하고 있어 고농도에 노출되는 것으로 판단된다.

표 3-2는 케톤계 화합물에 대한 측정결과를 비교한 것이다. MEK와 MIBK가 대부분이었으며 케톤계 화합물의 노출농도는 전체노출 유기용제의 10~20%이었다. 측정결과 작업장의 노출평균은 전반적으로 노출기준에 비해 낮은 것으로 평가되었다. 표 3-3은 아세테이트계 화합물에 대한 결과로 Ethyl Acetate, Butyl Acetate가 주로 사용되고 있으며, 노출농도는 전체노출 유기용제의 10~20%이었

다. 노출평균은 노출기준에 비해 매우 낮은 것으로 평가되었다. 그러나, 생식기계 장애물질로 알려진 2-Ethoxyethyl Acetate 취급부서의 경우 노출기준 대비 노출 수준은 다른 물질보다 높았다. 평균농도를 표시하지 않은 것은 동 물질이 작업장 전체에서 사용되는 것이 아니고 일부 취급공정에서만 노출되기 때문이다.

도료제조업체의 경우 대부분 단일 공정체제를 갖추기 어렵다. 즉 자동화할 수 있는 부분이 적다는 것인데, 이는 수요에 따라 여러가지 제품을 생산해야 하는 도료제품의 특성 때문이다.

표 3-1. 도료제조업체별 작업환경측정결과(방향족 화합물) (단위 : ppm)

사업장	시료수	Toluene		Ethylbenzene		Xylene	
		GM	Range	GM	Range	GM	Range
SH	24	0.46	0.10~ 3.04	0.81	0.14~ 3.65	1.66	0.30~ 8.04
KC	25	2.55	0.36~250.45	1.07	0.15~14.53	2.94	0.43~40.38
DH	24	7.59	0.11~ 28.38	1.09	0.23~ 3.62	4.23	0.49~17.96
DY	23	8.24	3.48~ 29.58	1.81	1.08~ 3.97	5.45	3.17~11.65
SY	14	8.86	0.91~ 34.34	0.22	0.08~ 0.65	1.31	0.20~ 4.80
IS	13	15.94	7.15~ 86.36				

표 3-2. 도료제조업체별 작업환경측정결과(케톤계 화합물) (단위 : ppm)

사업장	시료수	MEK		MIBK	
		GM	Range	GM	Range
SH	24	0.14	0.10~ 0.90	0.58	0.10~ 4.89
KC	25	0.18	0.10~22.33	0.47	0.13~ 1.73
DH	24	0.52	0.10~ 2.69	0.73	0.10~ 3.07
DY	23	1.75	0.27~42.29	3.45	0.78~24.56
SY	14	0.12	0.10~ 0.40	0.93	0.04~ 9.99
IS	13	6.07	1.13~36.69		

표 3-3. 도료제조업체별 작업환경측정결과(아세테이트계 화합물) (단위 : ppm)

사업장	시료수	Ethyl Acetate		Butyl Acetate		2-Ethoxyethyl Acetate	
		GM	Range	GM	Range	시료수	Range
SH	24	0.27	0.07~ 1.55			5	0.41~2.34
KC	25	0.59	0.18~11.84	1.15	0.04~16.42	2	0.47~1.16
DH	24	0.54	0.07~ 1.99	0.61	0.05~ 3.52	10	0.25~2.02
DY	23	1.65	0.44~20.70	1.29	0.39~19.63		
SY	14			0.06	0.05~ 0.26		
IS	13						

따라서, 하루에도 수 차례 제품의 구성성분을 조정하고 이에 따라 각종 용기의 세척작업이 수반된다. 이러한 다품종소량 생산체제는 사업장 규모에 따라 다소 차이가 있기는 하나 대부분의 도료제조업체의 특징이라 할 수 있다.

그림 3-1은 노출농도가 전체노출 유기용제의 50% 이상을 차지하는 방향족 화합물인 Toluene, Ethylbenzene, Xylene에 대한 업체별 농도분포를 나타낸 것이다.

측정결과에서 SH사의 노출농도는 다른 업체에 비해 낮은 편인데, 이는 동 업체의 경우 전반적으로 환기시설이 설치되어 있으며, 공정간 구별이 가능하고, 공간적 여유가 있는 작업장이었다. 동 업체의 작업공정은 다른 업체와 같이 수지제조, 배합, 연화, 조정, 포장공정으로 나눌 수 있다. 수지제조공정은 주로 대규모업체에서 보유하고 있으며, 자동화 공정으로 작업자의 유해물질 노출수준은 낮은 편이고 SH사의 경우도 그러하였다. SH사의 배합공정은 6개의 조사대상업체중 특히 작업자의 노출수준이 낮았는데, 이것은 다른 업체와 달리 원료투입구 밀폐정도가 우수하고 환기시설의 상태가 양호하기 때문이다. 다른 업체의 경우 원료투입구가 개방되어 있거나 원료투입후 별도의 뚜껑을 덮어놓고 있었다. 그러나, 뚜껑이 있어도 덮어놓지 않은 경우가 많았다. SH사의 경우 투입구 뚜껑에 경첩을 달아 작업자의 불편을 덜어 주었으며, 투입구 밀폐정도가 매우 양호하였다. SH사의 연화 및 조정작업 또한 작업자의 노출수준이 양호한 편이었는데, 이는 각 용기의 상부에 용기 크기에 맞게 후드 크기의 조절이 가능한 국소배기시설이 설치

되어 있기 때문이라 판단된다. 타 업체의 경우에도 용기 상부에 국소배기시설이 설치되어 있으나 크기가 안 맞아 환기효율이 저조한 실정이었다. 포장작업의 경우도 타 업체에 비해 작업자의 유해물질 노출수준이 낮은 데, 이는 Flexible 닥트가 설치되어 있어, 포장작업시 이동해 가며 국소배기할 수 있도록 하였기 때문으로 판단된다.

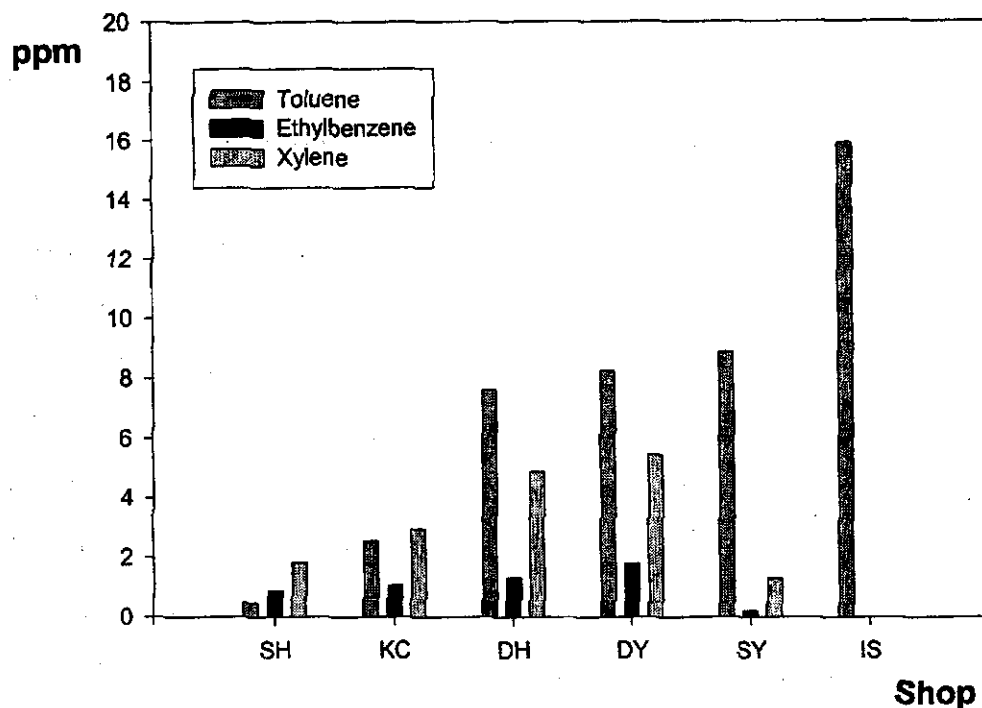


그림 3-1. 방향족화합물에 대한 사업장별 농도분포

일부 사업장에서 포장작업시 노출수준이 높은 이유는 반응기가 여러 대이고, 수시로 제품이 바뀌는 관계로 적절한 환기시설 도입이 어렵기 때문인데, 동 사업장의 경우는 이동가능한 Flexible 닥트 설치로 이러한 문제점을 해결하였다. 작업자들의 올바른 사용과 환기효율을 적절하게 유지해 준다면 효과적인 방법이라 할 수 있겠다. 다만 동 사업장의 경우는 보호구 착용률과 유기용제 취급방법 및 유해성 등에 관한 인식수준이 낮았다. SH사는 일부 공정에 대한 국소배기시설 성

능 등 미비점 보완과 작업자에 대한 관리적 측면 및 작업자의 인식수준 향상 등이 이루어지면, 도료제조업체의 유해물질 관리모델로서 제시될 수 있을 것이다.

나. 작업공정별 작업환경측정 결과

도료제조업체의 작업공정별 작업환경측정 결과를 표 3-4에 나타내었다. 도료제조공정은 크게 배합(원료투입), 연화(밀링, 샌딩, 롤링 등), 조정(조색, 희석), 포장, 수지제조공정으로 나눌 수 있으며, 업체에 따라 신너제조공정을 보유하고 있다. 이는 도료 수요자의 경우, 도료 이외에 신너구입을 요구하고 있고, 신너는 도료에 포함되어 있는 유기용제가 주성분이므로, 도료제조업체에서 신너를 가장 잘 제조할 수 있기 때문으로 판단된다.

표 3-4는 도료제조업체에서 전체노출 유기용제의 60~90%를 점유하는 방향족 화합물에 대한 업체별 측정결과를 공정별로 정리한 것이다. 가장 높은 노출수준을 나타낸 톨루엔의 경우 노출수준은 자동화 공정인 수지공정을 제외하면 3.37~10.36 ppm으로 노출기준에 비해 1/10정도 수준이며, 에틸벤젠과 크실렌은 0.54~1.57 ppm, 1.57~5.35 ppm으로 평균 노출수준은 낮은 것으로 평가되었다. 그림 3-2는 표 3-4의 자료를 이용하여 작업공정별 노출농도를 비교한 것이다.

표 3-4. 도료제조 공정별 작업환경측정 결과(방향족 화합물) (단위 : ppm)

공정	시료수	Toluene		Ethylbenzene		Xylene	
		GM	Range	GM	Range	GM	Range
배합	24	4.05	0.20 ~ 48.24	0.54	0.12 ~ 3.97	1.57	0.16 ~ 11.65
연화	28	6.32	0.41 ~ 86.36	0.80	0.12 ~ 3.76	1.98	0.16 ~ 9.86
조정	23	3.37	0.15 ~ 29.58	1.26	0.18 ~ 3.02	3.80	0.32 ~ 11.12
포장	17	6.50	0.23 ~ 250.45	0.98	0.08 ~ 3.62	3.06	0.22 ~ 9.19
수지	15	0.79	0.10 ~ 21.97	0.32	0.12 ~ 4.50	0.92	0.16 ~ 16.13
신너	5	10.36	4.93 ~ 117.86	1.57	0.68 ~ 14.53	5.35	2.54 ~ 40.38

공정간 차이에 대한 비교평가 결과, 전반적으로 비슷한 노출수준을 보여 공정간 노출수준에는 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 대부분의 업체에서 유사한 물질을 사용하고 있고 공정간 구분이 명확하지 않고 작업자의 작업 또한 구분이 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 특히 일부 중소기업의 경우 한 공간에 모든 제조공정이 혼재되어 있고, 작업자 또한 동시에 여러 작업을 수행하고 있다. 이렇게 전반적으로 유기용제 노출수준이 공정간에 큰 차이가 없는 것이 도료제조업의 특징이라 할 수 있다.

수지 제조공정의 경우 타 공정에 비해 노출수준이 낮았는데, 이는 동 공정이 자동화되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 작업자의 작업내용은 반응상태 확인이 주요업무이다. 신너제조공정은 도료제조공정이라 할 수 없으나 도료의 주요원료가 신너성분에 많이 포함되어 있으며, 대부분의 도료는 신너와 혼합하여 사용하므로 많은 도료제조업체에서 신너공정을 지니고 있어 공정간 비교평가에 포함하였다. 신너제조공정에서 사용되는 물질 또한 전체 유기용제의 50% 이상이 방향족 화합물로, 노출수준은 다른 도료제조공정과 큰 차이가 없었다.

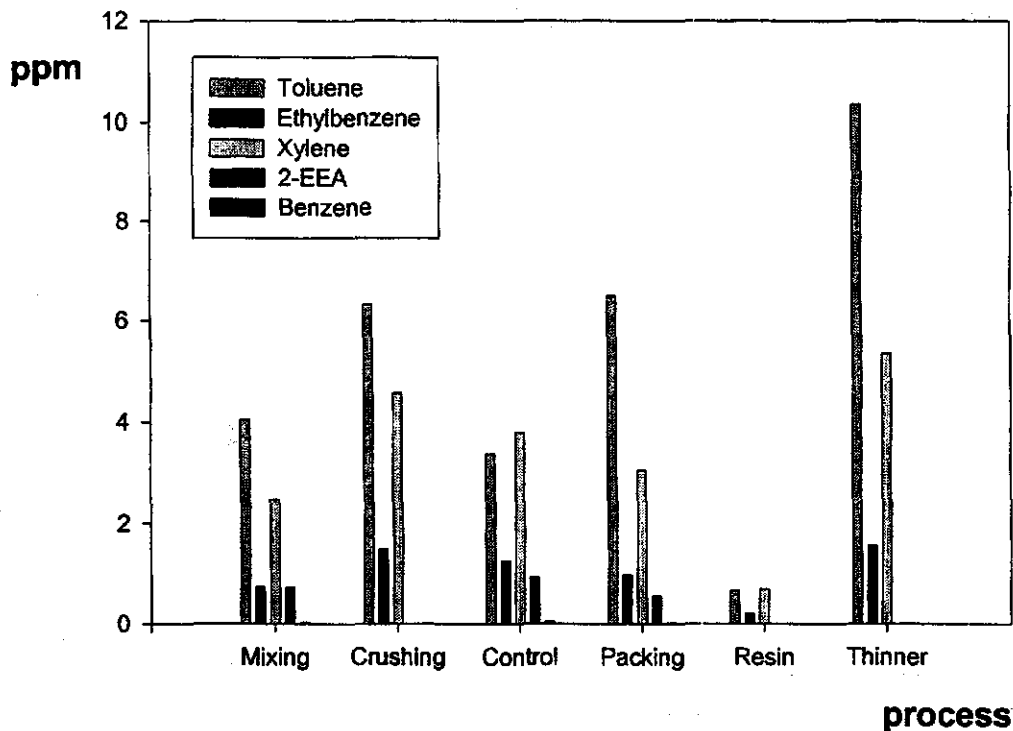


그림 3-2. 작업공정별 노출수준

다. 물질별 노출수준

도료제조업체에서 주로 사용되는 유기용제의 종류에 따른 작업자 노출수준의 비교결과를 표 3-5에 나타내었다. 도료제조업체에서 사용되는 유기용제는 Toluene, Xylene, Ethylbenzene 등 방향족 화합물과 MEK, MIBK 등 케톤계 화합물, Butyl Acetate, Ethyl Acetate 등 아세테이트계 화합물로 크게 나눌 수 있다. 표에서 제시한 자료는 분석결과 검출된 시료에 대해 정리한 것이다. 총 124건의 시료가 채취되었으며, 방향족 화합물인 Toluene, Xylene, Ethylbenzene의 경우 대부분의 시료에서 검출되었으며, 농도는 전체 노출 유기용제의 약 60%를 점유하는 것으로 평가되었다. MEK, MIBK는 60~85%의 시료에서 검출되었으며, 검출량은 전체 노출 유기용제의 20% 정도이었다. Butyl Acetate와 Ethyl

Acetaete는 60~70%의 시료에서 검출되었으며 검출량은 전체 노출 유기용제의 15% 정도이었다.

표 3-5. 도료제조업체의 물질별 노출수준 비교 (단위 : ppm)

물 질 명	시료수	TLV	GM	GSD	Range
Toluene	123	100	3.98	5.06	0.11~50.45
Xylene	109	100	3.02	2.61	0.20~40.38
MEK	74	200	1.21	4.09	0.15~42.29
Butyl Acetate	71	150	1.06	3.23	0.04~19.63
MIBK	106	50	0.99	3.27	0.04~24.56
Ethylbenzene	108	100	0.98	2.62	0.08~14.53
IPA	61	400	0.88	3.63	0.14~14.43
Ethyl Acetate	86	400	0.79	2.80	0.14~20.70
2-Ethoxyethyl acetate	17	5	0.79	2.04	0.25~ 2.34
Benzene	30	10	0.07	2.46	0.03~ 1.32

한편 조혈기계 장애를 일으키는 것으로 알려진 벤젠과 생식기계 장애를 일으키는 것으로 알려진 2-Ethoxyethyl Acetate의 경우 모든 시료에서 검출되지는 않았지만, 벤젠의 경우 25% 정도의 시료에서 검출되었으며, 노출농도는 0.07 ppm(0.03~1.32 ppm), 2-Ethoxyethyl Acetate는 15% 정도의 시료에서 검출되었으며, 노출농도는 0.79 ppm(0.25~2.34 ppm)이었다. 벤젠의 노출수준으로 판단할 때 직접 단일용제로 사용되기보다는 도료제조시 사용되는 신너의 성분중에 포함되어 신너를 사용하는 일부 공정에서 작업자가 노출된 것으로 판단된다. 벤젠 검출여부는 업체에 따라 차이가 있는 데, 이는 도료제조시 사용하는 신너의 종류에 의한 것이다. 따라서 신너는 구입 전에 MSDS 및 성분분석자료 등을 충분히 검토하여 신중하게 선택하여야 한다.

2-Ethoxyethyl Acetate의 경우 연화, 조정, 포장 등의 공정에서 주로 검출되었는 데, 특히 조정공정에서 노출수준이 높은 것으로 평가되었다. 2-Ethoxyethyl Acetate는 일반적으로 유지 및 수지류의 용제로 많이 사용되는 데, 도료제조업체의 조정공정은 배합 및 연화후 최종적으로 제품조색 및 점도 등을 조정하는 공정으로 2-Ethoxyethyl Acetate는 도료제조업체에서 사용되는 유기용제중 비중, 비점, 점도가 높아 주로 조정공정에서 사용되는 것으로 판단된다. 측정결과 일부 시료에서만 검출되었고, 노출수준 또한 노출기준에 비해 낮기는 하나 물질의 유해성을 고려할 때 주의깊은 사용 또는 물질대체하여야 할 것이다.

라. 도료제조업체의 규모별 작업환경측정 결과

도료제조업체의 규모에 따른 작업자의 Toluene 노출수준의 비교평가결과를 표 3-6에 나타내었다. Toluene은 작업환경측정 결과 총 124건의 포집시료중 123건이 측정되어, 거의 모든 시료에서 검출되었으며, 노출농도 또한 다른 유기용제에 비해 상대적으로 높게 나타나 Toluene에 대해서만 비교 평가하였다. 사업장은 작업자수 300인 이상의 대규모업체와 그 이하의 중소규모업체로 구분하였다. 조사대상업체는 6개 업체이며, SH사, KC사, DH사가 대규모업체이고, SY사, IS사, DY사가 중소규모업체이다. 비교평가는 모든 도료업체에서 이루어지는 공정인 배합, 연화, 조정, 포장공정만을 대상으로 하였으며, 수지공정과 신너공정은 일부 업체에서만 작업이 이루어지므로 비교평가에서 제외하였다. 그림 3-3은 도료제조업체의 규모별 Toluene 노출농도의 누적분포를 알기 쉽게 나타낸 것이다.

표 3-6. 도료제조업체의 규모별 작업환경측정 결과 (단위 : ppm)

공정	시료수	Toluene		
		GM	GSD	Range
대 규 모	57	2.13	5.45	0.15 ~ 250.45
중소규모	45	11.41	2.20	3.48 ~ 86.36

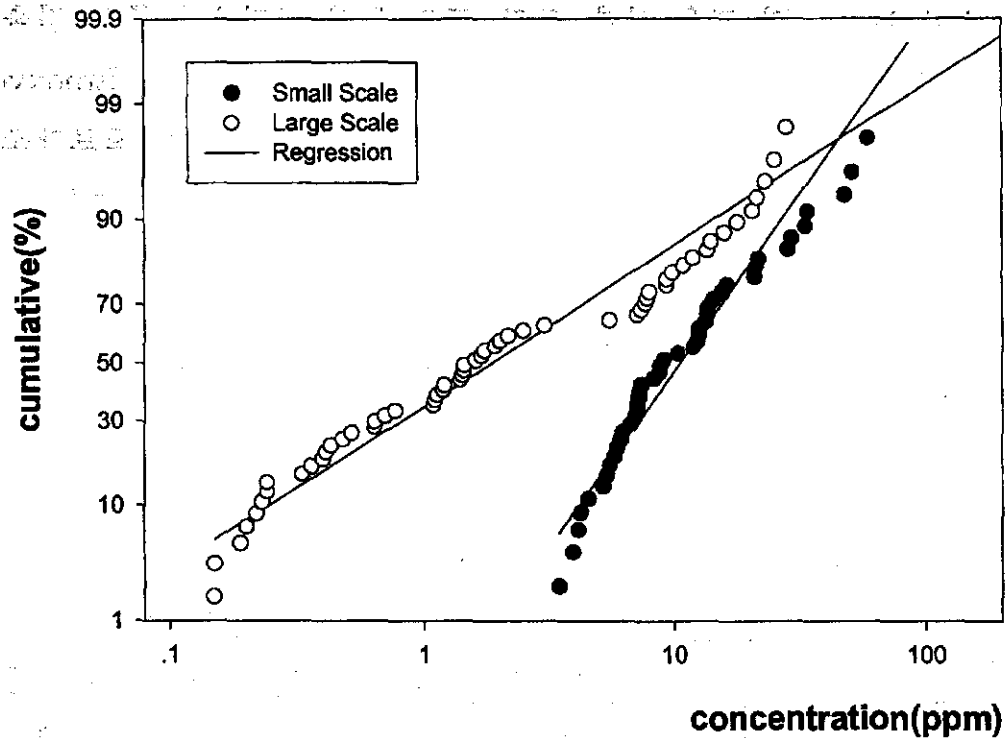


그림 3-3. 도료제조업체의 규모별 노출수준의 누적분포

중소규모보다는 대규모업체가 비교적 낮은 농도로 노출되는 것으로 나타났다. 시설의 노후상태, 자동화수준의 차이로 노출수준에 차이가 있는 것은 당연하나, 도료제조업체의 경우 작업공정의 공간배치와 공간의 크기에 많은 관련이 있는 것으로 판단된다. 대규모업체의 경우 공정간 층별로 구분 가능한 반면, 중소규모업체의 경우 공정간 구분이 뚜렷하지 않으며 작업공간이 좁고 작업자의 작업내용 또한 구분이 어려운 편이다. 따라서 중소규모업체의 경우 어느 한 곳에서 노출되면 작업장 전체로 확산되어 작업자 대부분이 비슷한 농도의 유해물질에 노출된다.

마. 혼합유기용제 Bulk 시료의 성분분석 결과

도료제조 및 도장작업시 사용하는 물질은 작업환경측정결과에서 알 수 있듯이 비교적 널리 알려져 있는 톨루엔, 크실렌 등 방향족 물질과 MEK, MIBK 등 케톤계 물질, 에틸아세테이트, 부틸아세테이트 등 아세테이트계 물질이 주를 이룬다. 이러한 물질은 신너형태로 공급되거나 공정특성에 따라 단일물질로 공급된다. 사업장 실태조사시 구성성분과 MSDS를 통해 성분확인이 가능한 신너제품과 단일공급물질은 Bulk시료채취를 제외하였으며, 이외에 사용하고 있는 복합유기용제 혼합물에 대해서는 성분확인을 위해 Bulk시료를 채취하여 GS-MSD로 분석하였다.

성분분석결과 도료제조업체의 경우 여러 곳에서 공통으로 사용되는 혼합물질을 발견할 수 있었으며, 이들은 모두 업체마다 고유의 일련번호를 부여하여 관리하고 있었다. 이러한 물질의 특징은 일반적으로 많이 알려져 있는 물질에 비해 b.p가 높으며 매우 많은 이성질체가 혼합되어 있다. 따라서 작업환경측정 대상에서 제외된 물질이었다. 참고로 다음에 제시하는 성분함량은 GC-MSD로 분석한 크로마토그램상 각각의 면적비로 함유량의 추정치일 뿐임을 밝혀 둔다. 동 혼합물질은 수십 종의 물질이 혼합되어 있어 각 구성성분에 대한 정확한 함량분석이 사실상 불가능하였다. 또한 다음 표에서는 물질의 구성성분을 주로 탄소수에 따라 분류하였는데, 개개의 물질로 구분하기에는 너무 많은 이성질체가 혼합되어 일일이 나열하기 곤란하기 때문이다.

바. 작업자의 호흡보호구 착용정도

도료제조업체 6개소의 시료채취 작업자를 대상으로 호흡보호구 착용정도에 대한 조사결과를 표 3-7에 나타내었다. 전체 70명중 17명만이 호흡보호구를 착용하고 있었다. 관리자와 상담결과 대부분의 사업장에서 호흡보호구를 지급하고 있다고 하나, 실제 착용율은 24.3%로 매우 저조하여 전반적으로 보호구착용에 대한 인식수준이 매우 낮은 것으로 조사되었다.

표 3-7. 작업자의 호흡보호구 착용율

규모	업체명	시료채취 작업자수	보호구 착용 작업자수	보호구 착용율(%)
중소규모		22	9	40.9
1	DY	9	5	55.6
4	SY	7	0	0
5	YS	6	4	66.7
대규모		48	8	16.7
1	DH	16	4	25.0
2	KC	13	1	0.1
3	SH	19	3	15.8
계	6개소	70	17	24.3

노출수준은 중소기업업체가 대규모업체에 비해 높았으나, 보호구 착용율은 중소기업업체가 높게 나타났다. 톨루엔에 대한 업체규모별 작업환경측정결과는 중소기업업체 11.41 ± 2.2 ppm, 대규모업체 2.13 ± 5.45 ppm으로 대규모업체에 비해 중소기업업체의 노출수준이 높았던 반면, 보호구 착용율은 중소기업업체 40.9%(9/22), 대규모업체 16.7%(8/48)로 중소기업업체에서 높게 나타났다. 중소기업체인 SY사의 경우 호흡보호구 착용작업자가 한 명도 없기도 하여 규모에 따른 차이가 있다고 단정할 수 없으나, 중소기업업체의 경우는 작업환경에 대한 불안감이 어느 정도 작용하는 것으로 판단된다.

한편, 배합공정에 근무하는 일부 작업자의 경우, 원료투입시 분진제거를 위해 마스크를 착용하나 일반 면마스크를 착용하고 있으며, 도료제조과정중 비교적 유기용제 취급이 많은 연화, 희석, 조정공정 작업자의 경우 대부분 보호구를 착용치 않고 있으며, 착용하는 경우도 일반 면마스크 및 면장갑을 착용하고 있었다.

사. 작업자 보건교육 및 취급물질의 인식정도

보건관리자에 의해 일반적인 보건교육은 실시되고 있으나, 취급현황을 보면 전반적으로 취급물질에 대한 정확한 정보 및 유해성에 대한 인식이 낮으며, 특히 유기용제의 경우 제품번호로 취급되고 있어, 일부 작업자는 제품번호와 제품의 정확한 명칭 및 유해성에 관해 알지 못하였다. 또한 MSDS는 확보하고 있으나

작업자가 물질을 실제로 취급하는 설비주변이나 휴게실에 유해물질의 고유번호별 물질명, 취급방법 등에 관한 자료를 요약, 게시할 필요성이 있다. 전반적으로 용기용제의 평균 노출수준은 노출기준에 비해 낮은 편이나, 수시로 이루어지는 용제공급, 용기세척, 포장작업 등 도료제조 특성상 단기간 고농도 노출가능성이 크므로 보호구착용은 필수적이라 할 수 있다.

2. 실험결과와 수치해석결과 비교

가. 원통형 및 정방형 후드

원통형 후드는 원통을 중심으로 2차원 축대칭모델(Axisymmetry model)을 적용하였다. 정방형 후드는 후드개구부를 중심으로 종횡으로 각각 2등분하여 4등분한 다음 y-z축과 z-x축을 중심으로 대칭모델(Symmetry model)을 적용하였다.

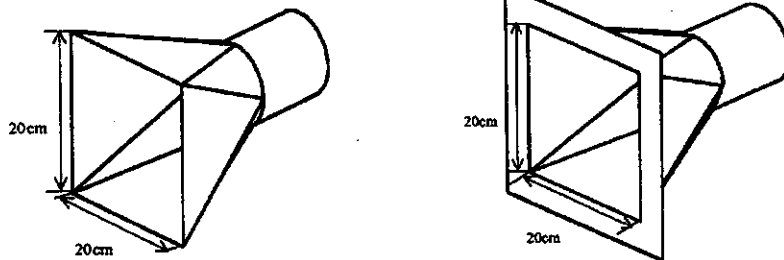
1) 수치해석 모델

원통형 후드는 Dalla Valle(1952)의 Hood 흡인실험에 사용된 것과 같은 규격으로 후드의 직경은 15cm, 흡인유속은 20m/s이다. 정방형 후드개구면의 크기는 가로, 세로 20cm인 정사각형으로 정하였다. 정방형 후드 배기유량은 18m³/min, 개구면 유속은 7.5m/s이다. 그림 3-4는 원통형 후드와 정방형 후드 모델을 나타낸 것이다.



(a) Unflanged circular opening

(b) Flanged circular opening



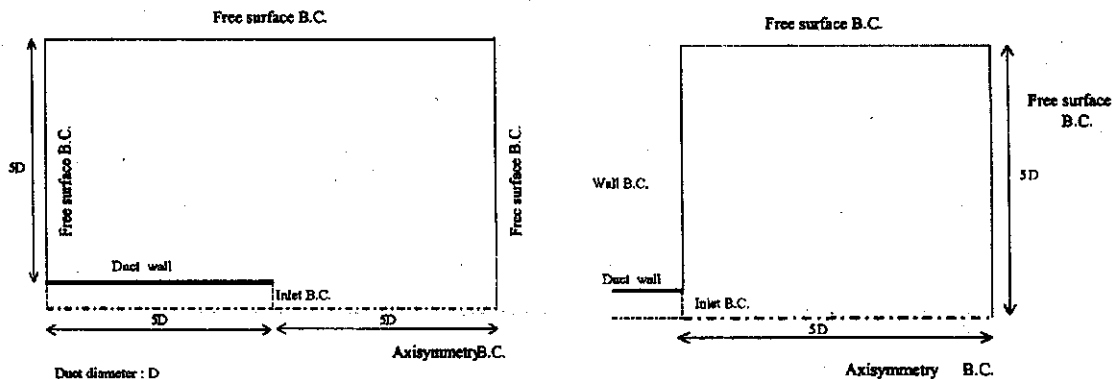
(c) Unflanged square opening

(d) Flanged square opening

Fig. 3-4 Circular and square hoods for numerical simulation.

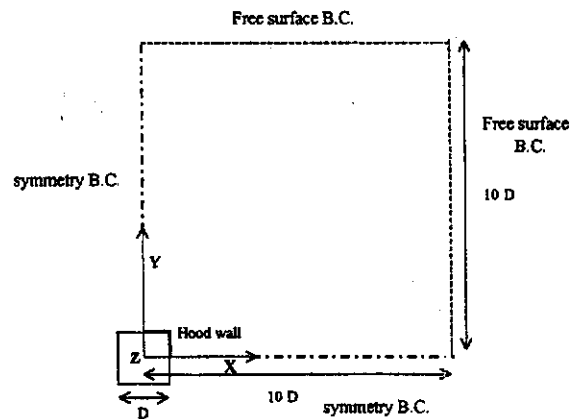
2) 경계조건

후드입구면을 Inlet 경계조건으로 설정하여 Fixed velocity 조건을 적용하였다. 또한 Free surface는 Outlet 경계조건으로 설정하여 Fixed pressure 조건을 적용하였다. 플랜지는 Wall B.C.을 적용하였다. Wall에서는 유체유동이 발생하지 않으므로 Wall B.C. 뒷면, 즉 후드입구 뒷면은 계산영역에서 제외하였다. 원통형 후드의 총 격자수는 4,400개, 후드입구에는 15개의 격자를 형성시켰다. 또 플랜지부착 원통형 후드는 플랜지 뒷면에 격자를 형성시키지 않았기 때문에 원통형 후드에 비해 격자수가 1/2이 작은 2,200개를 형성시켰다. 정방형 후드의 총 격자수는 39,304개, 후드입구에서의 격자수는 x, y, z 방향 각각 9개씩 총 729개를 생성시켰다. 플랜지부착 정방형 후드의 경우 총 격자수는 28,900개로 정방형 후드보다는 적지만 후드입구에서 격자수는 정방형 후드와 같은 729개를 생성시켰다. 플랜지 길이는 무한한 것으로 간주하여 계산하였다. 각 모델에 대한 경계조건은 그림 3-5와 같다.



(a) unflanged circular opening

(b) flanged circular opening



(c) square opening (front view)

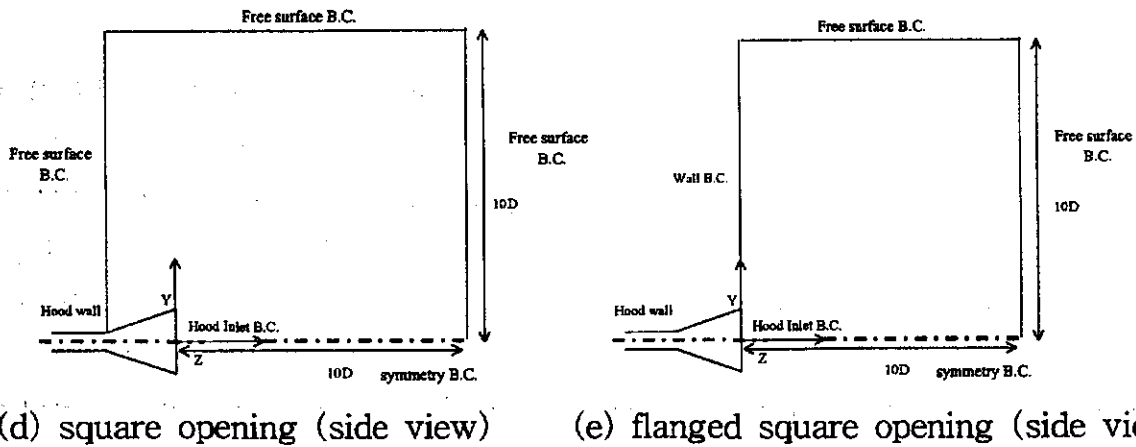


Fig. 3-5 Computational domain and coordinate system for general exhaust hoods

3) 수렴조건

충분히 수렴된 해를 구하기 위해 물리량의 최대변화량이 10^{-12} 이하가 될 때를 수렴된 것으로 간주하였다. 약 300회 정도 반복계산결과 물리량 변화가 10^{-12} 이하로 유지되어 수렴되었고, 완전한 수렴을 확인하기 위해 약 50회 정도 더 반복계산하였다. 본 연구에 사용된 컴퓨터(펜티엄 II, CPU-266Hz)를 이용하여 총 350회 정도의 반복계산시, 원통형 후드에서는 약 10분, 플랜지부착 원통형 후드는 약 5분 정도의 계산시간이 소요되었다. 또, 정방형 후드에 대해서 500회 정도의 반복계산에 소요되는 컴퓨터 계산시간은 정방형 후드가 약 25분, 플랜지부착 정방형 후드가 20분 정도였다.

4) 계산결과 검증방법

(1) 원통형 후드(Unflanged circular opening)

2차원 축대칭모델을 적용하여 계산한 수치해석결과의 정확도를 검증하기 위해 Dalla Valle(1952)과 Garrison(1977)의 실험식을 이용하였다. Dalla Valle의 중심선 속도 공식은 다음과 같다.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{1 + 12.73 (X/D)^2} \quad (8)$$

Garrison이 제시한 중심선 속도계산식은 다음과 같다.

$$\frac{V}{V_0} = 1.1 \times (0.06)^{X/D} \quad \text{for } X/D < 0.5 \quad (9)$$

$$\frac{V}{V_0} = 8(X/D)^{-1.7} \quad \text{for } 0.5 \leq X/D \leq 1.5 \quad (10)$$

또다른 실험결과로는 Kulmala(1995)가 Laser Doppler Anemometer(LDA)로 측정한 결과 및 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 수치해석결과와 비교하였다. 원통형 후드에 대한 계산결과의 정확도 검증방법은 표 3-8과 같이 요약할 수 있다.

표 3-8. Validation method of numerical solutions for plain circular opening

	Reference	Method
Measurement	Dalla Valle(1952)	Measurement
	Kulmala(1995)	LDA Measurement
	Garrison(1988)	Measurement
Numerical analysis	Kulmala(1995)	$k-\epsilon$ turbulence model

(2) 플랜지부착 원통형 후드(Flanged circular opening)

플랜지부착 원통형 후드에 대한 수치해석결과는 Dalla Valle(1952)의 측정결과 및 Flynn(1985)의 Potential flow solution을 이용한 수치해석결과와 비교하였다. 또 무한길이의 플랜지부착 원통 입구에서 유체의 유속을 계산할 수 있게 Drakal(1970)이 제시한 해석해를 이용하여 검증하였다. 식(11)은 Drakal이 제시한 무한길이의 플랜지부착 원통형 후드입구 중심선에서 유속을 구하는 식이다.

$$\frac{V}{V_0} = 1 - \frac{X/D}{\sqrt{0.25 + (X/D)^2}} \quad (11)$$

표 3-9는 플랜지부착 원통형 후드의 수치해석결과를 검증하기 위해 사용된 방법이다.

표 3-9. Validation method of numerical solutions for flanged circular opening

검증 모델	방 법
Dalla Valle의 측정결과(1952)	후드입구 유속측정
Flynn의 수치해석(1985)	Potential flow solution을 이용한 수치해석
Drakal의 해석해(1970)	무한길이의 플랜지를 지닌 원통형 후드입구 유속계산

(3) 플랜지가 없는 정방형 후드(Unflanged square opening)

플랜지가 없는 정방형 후드의 입구 유동 수치해석결과를 검증하기 위해 중심선속도에 대한 실험식을 완성시킨 Fletcher(1977)의 공식과 Dalla Valle의 측정결과를 비교하였다. Fletcher의 공식은 식(12)와 같다.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{0.93 + 8.58 \alpha^2} \quad (12)$$

$$\text{여기서, } \alpha = \left(\frac{X}{\sqrt{A}}\right) \left(\frac{L}{W}\right)^\beta, \quad \beta = 0.2 \left(\frac{X}{\sqrt{A}}\right)^{-\frac{1}{3}}$$

(4) 플랜지부착 정방형 후드(Flanged square opening)

플랜지부착 장방형 후드에 대한 수치해석결과 검증은 Tyaglo와 Shepelev(1970)가 제시한 해석해와 Dalla Valle의 측정결과를 이용하였다. Tyaglo와 Shepelev가 제시한 중심선속도 계산공식은 식(13)과 같다.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{LW}{2X\sqrt{4X^2 + L^2 + W^2}} \quad (13)$$

5) 결과 검증

(1) 원통형 후드(Unflanged circular opening)

실험결과와 비교

그림 3-6은 Dalla Valle(1952) 및 Garrison(1988)의 유속측정결과와 Kulmala(1995)가 LDA로 측정한 후드입구 중심선속도 측정결과를 CFD-ACE를 이용한 수치해석결과와 비교한 것이다. X/D가 0.3이하에서는 수치해석결과 및 Dalla Valle의 측정결과보다는 낮고 Garrison의 값보다는 약간 높게 예측하였다. 하지만 LDA측정결과와는 매우 일치하게 나타났다. 측정값과 수치해석결과를 비교해 보면, X/D가 0~0.4에서 약간 차이가 발생한 것을 제외하고는 측정결과와 수치해석결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

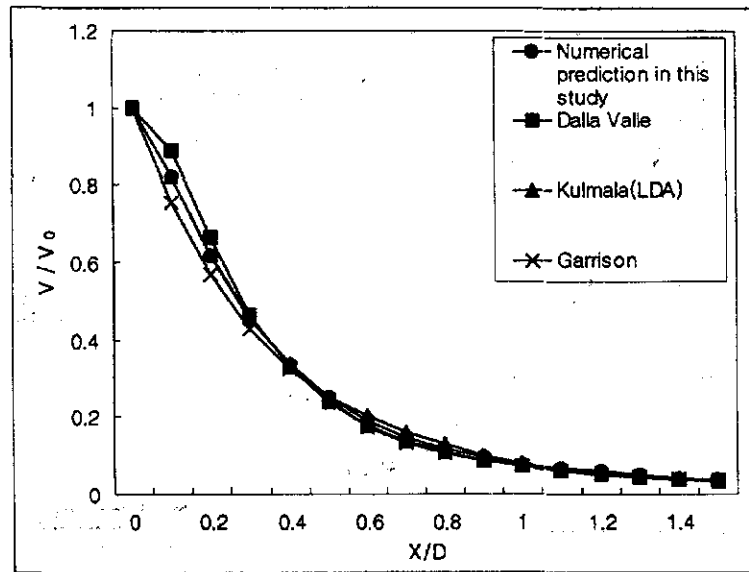


Fig. 3-6 Predicted and empirical center-line velocities for unflanged circular opening

수치해석의 정확도를 평가하기 위해 수치해석과 측정치의 차이를 백분율(%)로 계산해 보았다.

$$\text{차이}(\%) = \frac{\text{수치해} - \text{측정결과}}{\text{측정결과}} \times 100 \quad (14)$$

위식에 적용하여, Dalla Valle의 측정결과와 수치해석결과를 비교해보면, 평균 5% 정도 수치해석값이 높게 나타났다. 그리고 최대차가 발생한 지점은 X/D가 1.2인 지점에서 약 17% 정도 오차가 발생했다. Garrison의 결과와는 6.6% 정도 차이가 난다. 하지만, LDA측정결과와 비교하면, 평균 1.6% 정도 측정결과값이 높게 나타났고, 최대오차도 8% 정도에 불과해 수치해석으로 원통형 후드입구 유동장을 정확히 해석할 수 있는 것으로 나타났다.

다른 수치해석결과와 비교

그림 3-7은 Kulmala의 수치해석결과와 CFD-ACE를 이용한 수치해석결과를 비교한 것으로 Kulmala의 예측값보다 약간 낮게 나타났고, 두 값을 비교해 보면 약 9.3%정도 차이가 난다. 그러나, X/D가 1.1 이상이 되면 두 가지 수치모델이 매우 일치하였다.

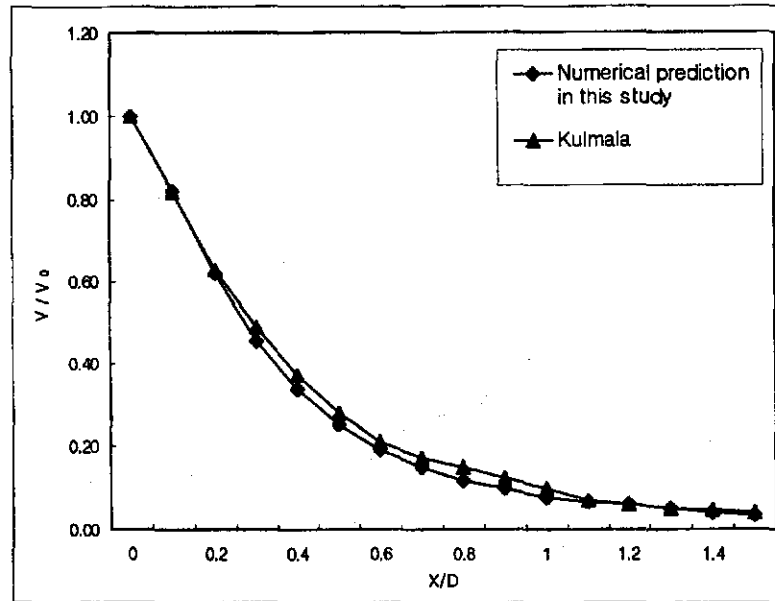
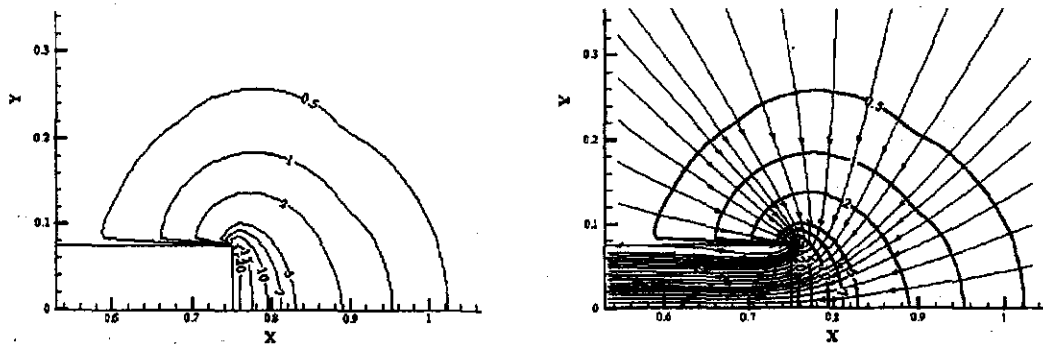


Fig. 3-7 Predicted centerline velocities for unflanged circular opening

그림 3-8은 원통형 후드에 대한 수치해석결과로 a)는 등속도선, b)는 등속도선과 유선을 나타낸 것이다. 등속도선을 보면, 후드입구에서는 타원형이지만 입구에서 멀어질수록 원형으로 변하는 것을 알 수 있다.



(a) Velocity contour (b) Velocity contour combined with streamline

Fig. 3-8 Velocity contour and Velocity contour combined with streamline for unflanged circular opening.

(2) 플랜지부착 원통형 후드 (flanged circular opening)

그림 3-9는 플랜지부착 원통형 후드에 대한 수치해석결과를 비교한 그림이다. 먼저, Dalla Valle의 측정결과와 비교했을 때 후드입구에서 약간의 차이가 발생했을 뿐 전반적으로 결과가 매우 일치하고 있다. 특히 해석해와는 후드입구 뿐

만 아니라 전체적으로 중심선 속도분포결과가 일치하고 있다. 난류유동을 고려하지 못한 Potential flow solution의 결과는 후드입구에서 발생하는 난류영향으로 후드입구에서 약간의 차이를 보이고 있지만, 후드입구에서 멀어질수록 측정결과와 매우 일치하고 있다. Dalla Valle의 실험결과와 수치해석해와의 차이는 약 4.8% 정도에 불과해 수치해석프로그램의 후드입구 유동장 해석능력이 우수한 것으로 나타났다.

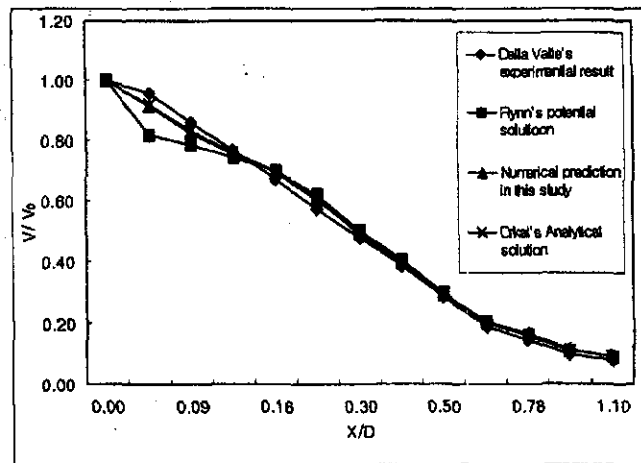
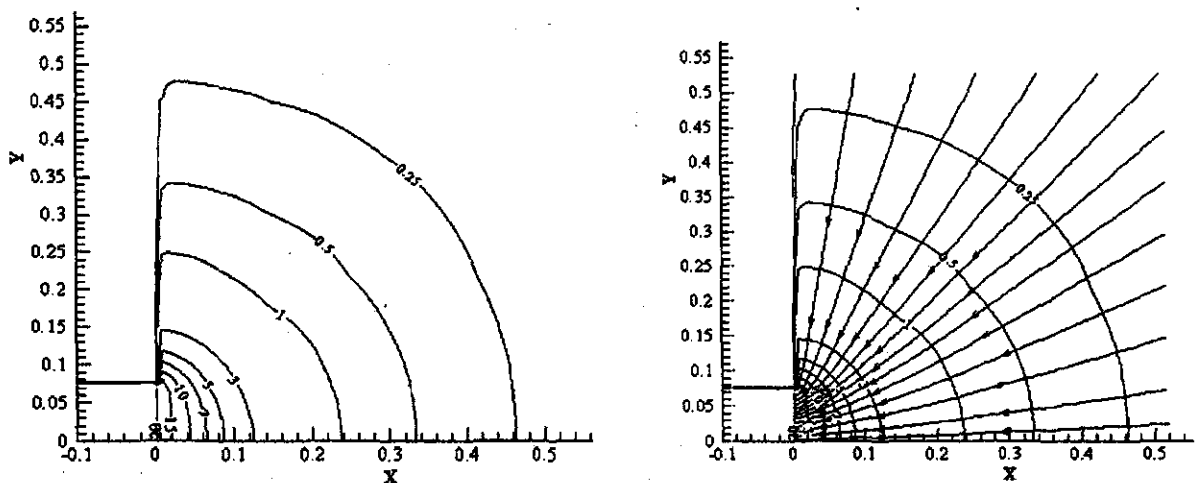


Fig. 3-9 Center-line velocities for flanged circular opening

그림 3-10은 플랜지부착 원통형 후드에 대한 등속도선과 유선을 나타낸 것이다.



(a) Velocity contour (b) Velocity contour combined with streamline

Fig. 3-10 Velocity contour and Velocity contour combined with streamline for flanged circular opening.

원통형 후드에 대한 수치해석결과를 실험결과와 해석해, 그리고 다른 수치 해석결과와 비교했을 때 본 연구에서 실시한 수치해석결과가 매우 정확하고 후드 입구유동 예측 능력이 충분하다고 판단된다.

(3) 플랜지가 없는 정방형 후드(Unflanged square opening)

그림 3-11은 Fletcher의 공식 및 Dalla Valle의 측정결과와 수치해석결과의 중심선속도를 비교한 것이다. 결과 비교시 Dalla Valle의 측정결과는 공식화한 자료가 없어 그래프에 제시된 자료를 읽었기 때문에 정확한 값으로 인정하기는 어렵지만 후드입구 유동장에 대한 현상파악은 할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 3-18에서 알 수 있듯이 Dalla Valle의 실험결과와 수치해석결과 그래프를 비교해 보면, 중간부분에 약간의 차이가 있을 뿐 매우 잘 일치하고 있다.

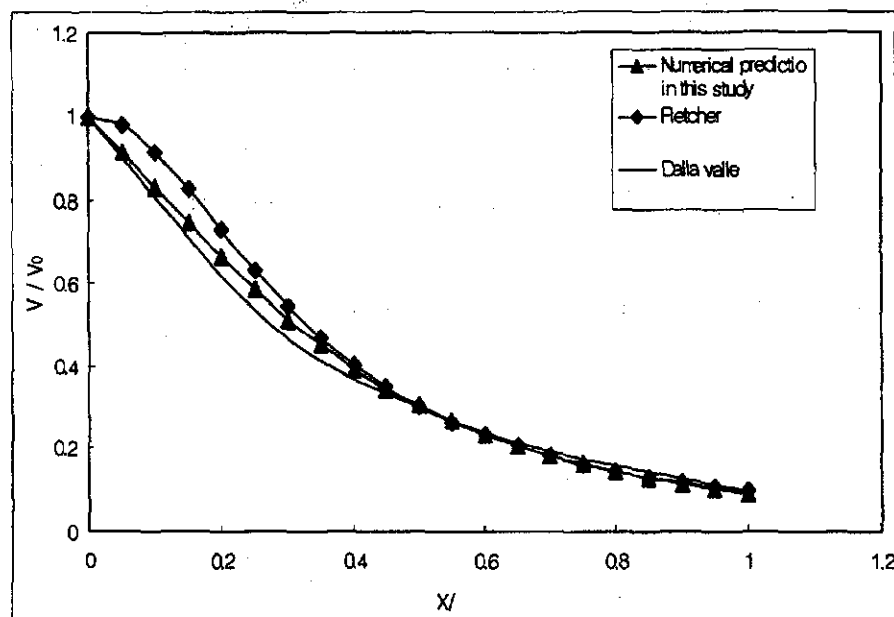
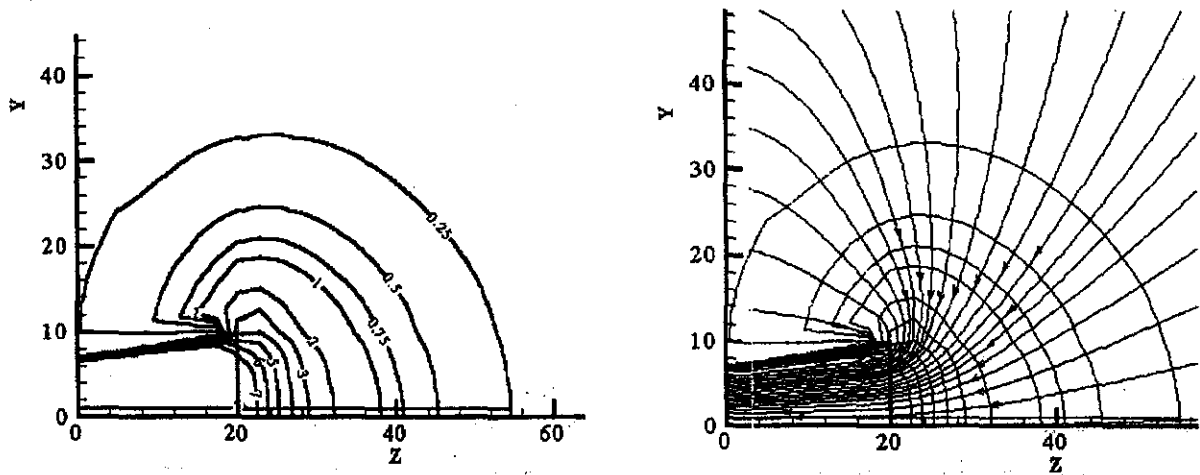


Fig. 3-11 Predicted and empirical centerline velocities for unflanged rectangular opening

Fletcher의 실험결과와 수치해석결과를 비교해 보면, 전체적인 차이는 평균 3%정도였고 가장 큰 차이는 9% 정도였다. 결과에서 알 수 있듯이 후드입구에서 약간의 오차가 있지만, X/D 가 약 0.5 이상이 되면 세 결과가 거의 일치하였다.

그림 3-12는 정방형 후드에 대한 수치해석결과를 나타낸 것으로, y-z면의 등속도선과 유선을 나타낸 것이다.



(a) Velocity contour

(b) Velocity contour combined with streamline

Fig. 3-12 Velocity contour and Velocity contour combined with streamline at y-z plane for unflanged square opening.

(4) 플랜지부착 정방형 후드(Flanged square opening)

그림 3-13은 해석해, Dalla Valle의 측정결과와 수치해석결과를 나타낸 그림이다. 수치해석결과와 해석해를 비교해 보면, 평균 약 2.4% 정도의 오차를 보여 두 예측결과가 매우 잘 일치하며, Dalla Valle의 실험결과와도 거의 일치하고 있다.

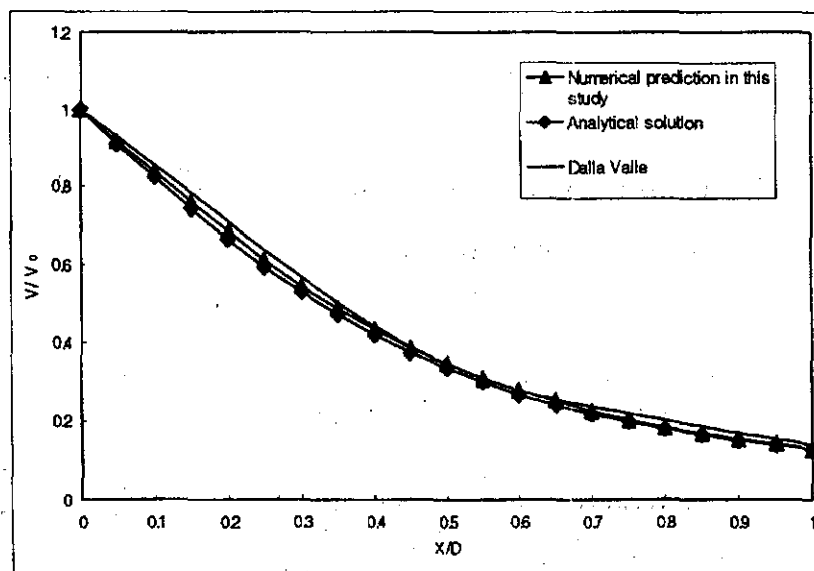
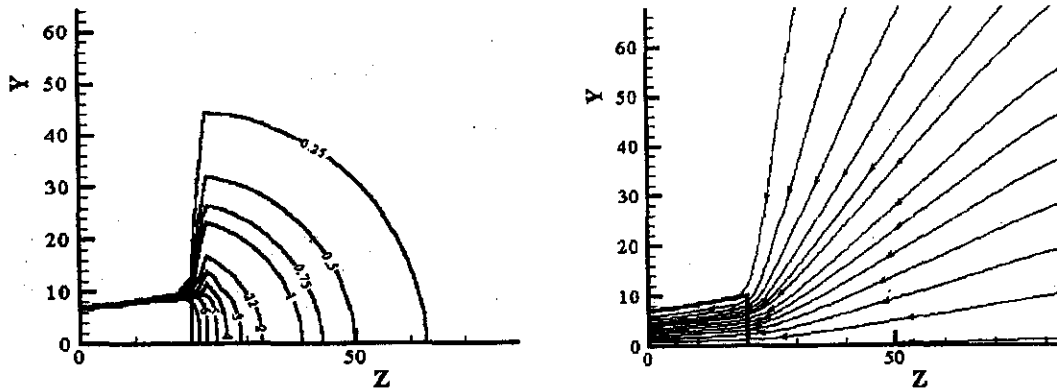


Fig. 3-13 Predicted and empirical centerline velocities for flanged rectangular opening

그림 3-14는 플랜지부착 정방향 후드에 대한 등속도선과 유선을 y-z면에 대해 나타낸 것이다.



(a) Velocity contour

(b) Streamline

Fig. 3-14 Velocity contour and Streamline at y-z plane for flanged square opening.

나. 푸쉬-풀 후드

CFD-ACE의 분류(Jet)에 대한 예측능력을 평가해보기 위해, Heinsohn(1991)이 급기 유량 및 유속을 변화시키면서 실시한 3가지 수치실험과 같은 조건으로 푸쉬-풀 후드에 대한 수치해석을 하여 Heinsohn의 결과와 비교했다.

1) 수치해석 모델

Heinsohn이 푸쉬-풀 후드에 대해 실시한 모델의 조건은 표 3-10과 같다.

표 3-10. Configurations of push-pull ventilation system for numerical simulation

Case	QB m ³ /s per m of slot	SB (m)	UB (m/s)	QE/QB
1	0.0571	0.00725	7.88	8.67
2	0.0285	0.00725	3.93	17.34
3	0.0571	0.01500	3.81	8.67
슬롯길이당 배기유량 (QE/L) : 0.495 m ³ /s/m				
액 표면적당 배기유량 (QE/A) : 0.283 m ³ /s/m ²				
용기 너비 (W) : 1.8 m				
Pull hood 높이(SE) : 0.195 m				

QB : Flow rate of push nozzle

SB : Push nozzle height

QE : Flow rate of exhaust slot

UB : Push air velocity

표 3-10에서 알 수 있듯이 Heinsohn의 수치해석에서는 배기량을 슬롯길이당 $0.495 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 로 고정하고, 푸쉬노즐 급기량(QB)과 급기유속(UB)을 변화시켰다. 각 모델에 대한 급기량과 유속변화에 따른 비교는 다음과 같다.

Case 1과 Case 3을 비교해 보면, 급기량은 슬롯길이당 $0.0571 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 동일하지만 급기유속은 Case 1이 Case 3보다 2배 빠르게 설정되어 있다. 즉 푸쉬-풀 후드에 있어 급배기 유량이 같을 때 푸쉬노즐의 유속에 의한 환기장치의 효율을 평가했다.

Case 2와 Case 3의 비교에서는 푸쉬노즐의 유속이 3.93 m/s 와 3.81 m/s 로 거의 동일할 때, 급기량 차이에 따른 푸쉬-풀 후드의 기류변화를 예측하여 효율을 평가했다.

2) 경계조건 및 수렴조건

그림 3-15는 푸쉬-풀 후드 모델의 경계조건을 나타낸 것이다. 자유표면인 윗면과 왼쪽면은 일정압력 조건을 주었다. 푸쉬노즐은 급기량을 쉽게 맞추기 위해 일정속도 조건을 주었다. 풀후드는 유입부 조건을 주어 배기량을 풀후드 단면적으로 나눈 속도값으로 풀후드 단면적에서 균속배기된다고 가정하여 일정속도 조건을 주었다. 격자수는 2,025개(가로×세로: 45×45)로, 푸쉬노즐에 3개, 배기슬롯에 15개를 생성시켰다. 물리량의 최대변화량이 10^{-12} 이하가 될 때를 수렴된 것으로 간주하고, 300회 정도 반복계산결과 물리량 변화가 10^{-12} 이하로 유지되어 수렴되었다. 이때 계산시간은 약 5분 소요되었다.

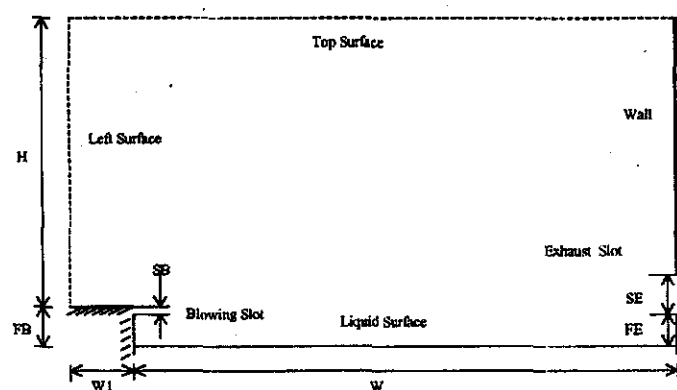


Fig. 3-15 Computational domain for push-pull ventilation system

3) 결과 비교

Heinsohn이 실시한 각 모델에 대한 수치해석결과를 요약하면 다음과 같다.

동일한 급배기 유량으로 급기유속을 변화시켰을 때 푸쉬-풀 후드의 성능을 비교 평가한 Case 1과 Case 3의 예측결과에서, 급기유속이 낮은 Case 3의 경우에 푸쉬노즐 근처에서 제트기류의 흐름이 완만하고 액표면을 가로질러 부드럽게 지나가기 때문에 작업장으로 유출되는 오염물질농도가 Case 1보다 낮은 것으로 예측되었다. 이 현상은 Case 1의 푸쉬노즐에서 빠른 속도로 공기를 분사시키면, 공기의 점성에 의해 Case 3보다 푸쉬노즐 주위에서 다량의 공기가 풀후드 쪽으로 이동하게 된다. 하지만 배기량은 일정하므로 푸쉬노즐의 빠른 기류를 따라 이동한 다량의 공기를 충분히 배기시키지 못하게 되어, 후드의 배기효율을 저하시키게 된다.

푸쉬노즐 분사속도는 거의 동일하게 유지하고, 급기량 차이를 두 배로 설정한 Case 2와 Case 3의 예측결과 비교에서는, 급기량이 많은 Case 3에서 오염물질 배출이 적게 나타났다. 동일유속으로 급기하더라도 급기량이 적으면 푸쉬노즐에서 기류분사후 급격히 속도가 저하되어, 풀후드까지 충분히 기류를 밀어주지 못해 배기효율이 저하된다. Heinsohn의 예측결과에 의하면, 폭 1.8 m인 개방조에서는 푸쉬노즐 유량은 액표면적당 $0.283 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$, 푸쉬노즐 급기유속은 3.81 m/s 일 때 푸쉬-풀 후드의 배기효율이 가장 우수하였다.

CFD-ACE(Ver 4.0)를 이용한 Case 1~3에 대한 수치해석결과는 다음과 같다.

그림 3-16은 푸쉬-풀 후드의 유선을 나타낸 것이다. Case 1에서는 빠른 급기 기류에 의해 푸쉬노즐 주위의 기류가 풀후드 쪽으로 밀려가지 않고, 오히려 푸쉬노즐 쪽으로 빨려 들어오는 것을 알 수 있다. 하지만, Case 2와 Case 3에서는 푸쉬노즐 주위의 기류가 노즐 쪽으로 빨려 들어오지 않고, 푸쉬기류에 의해 풀후드 쪽으로 밀려가고 있다. Heinsohn의 수치해석결과와 마찬가지로 빠른 푸쉬노즐의 기류에 의해 푸쉬노즐 주위의공기가 노즐 쪽으로 이동하고, 다량의 공기가 빠른 속도로 풀후드 쪽으로 이동하므로 풀후드가 충분히 배기시키지 못하는 현상이 발생하게 된다.

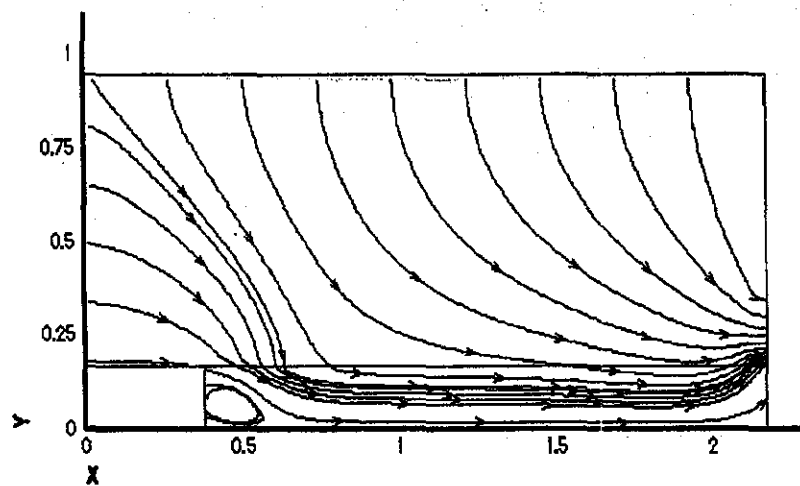
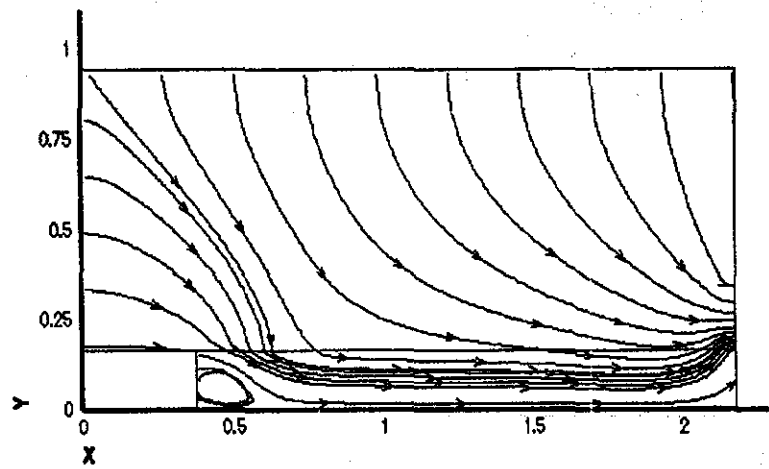
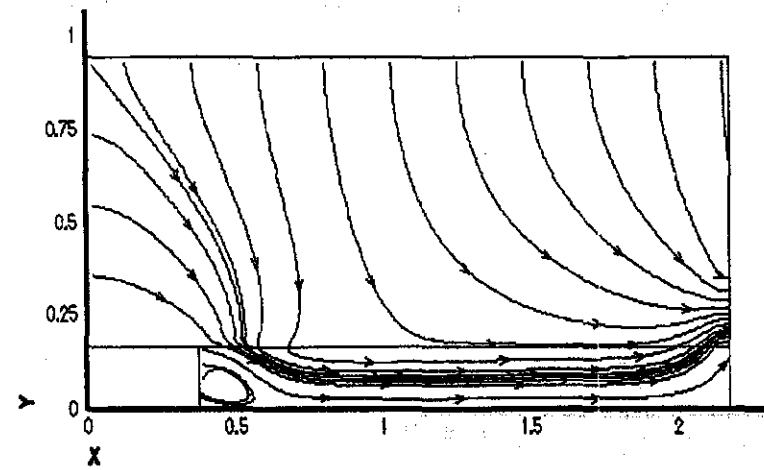
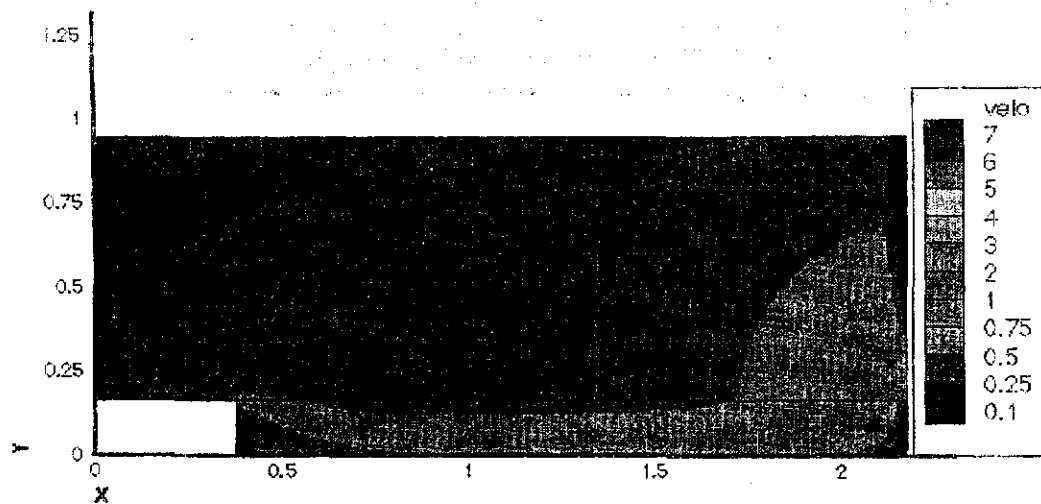
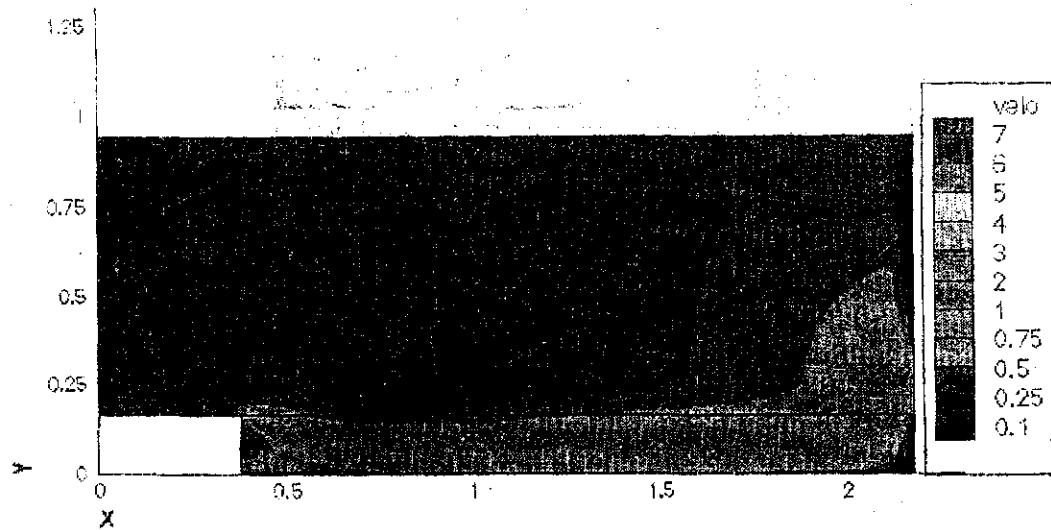


Fig. 3-16 Streamline for Case 1, Case 2 and Case 3. respectively

그림 3-17은 3가지 모델에 대한 수치해석결과를 등속도선으로 나타낸 것이다. Case 1과 Case 3의 비교에서, 유선에서와 마찬가지로 Case 1보다 Case 3에서 0.25 m/s 등속도선이 더 넓은 면적으로 분포되어 오염물질의 제어효율이 더 우수한 것을 알 수 있다.



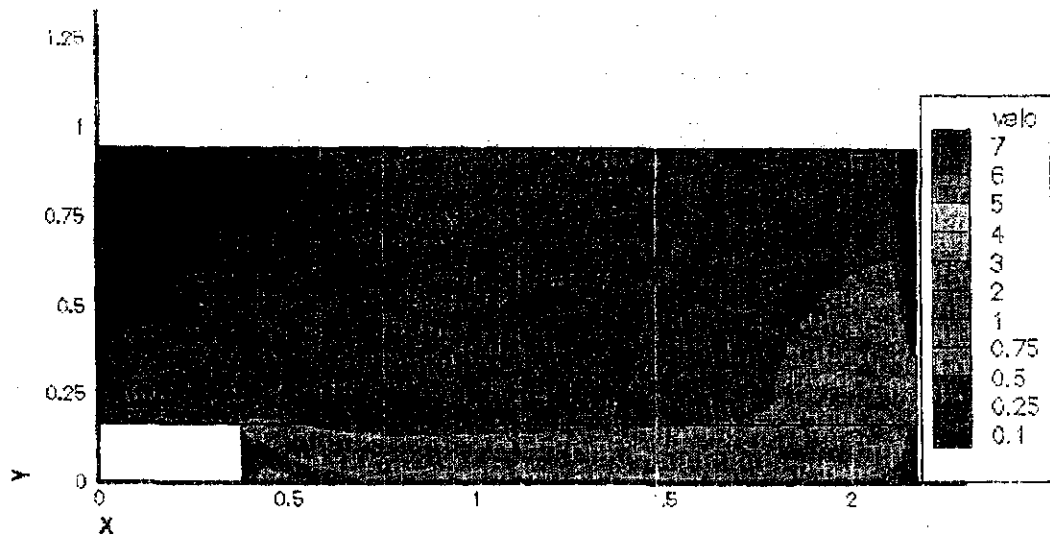


Fig. 3-17 Velocity contour in Case 1 , Case 2 and Case 3, respectively

또, Case 2와 Case 3을 비교해 보면, Case 3은 적당한 급기량으로 푸쉬노즐에서 분사된 기류가 액표면 위에서 약 1m/s 정도의 속도를 유지하고 있지만, 급기량이 부족한 Case 2에서는 푸쉬노즐에서 분사후 급기유속이 급격하게 줄어들어 0.5 m/s 이하의 낮은 유속으로 액표면 위를 흐르는 것을 알 수 있다. 즉 Heinsohn의 수치해석결과와 같이 푸쉬노즐에서 분사속도는 같지만 급기량이 적기 때문에 Case 2의 푸쉬노즐이 액표면 위의 기류를 플후드 쪽으로 충분히 밀어주지 못하는 것으로 나타났다.

이상 세 가지 모델에 대한 수치해석결과를 요약하면 다음과 같다.
수치해석결과, 같은 유량을 급배기 시키더라도 급기구 유속이 너무 강하면 푸쉬노즐의 기류에 의해 노즐 주위의 공기가 플후드 쪽으로 많이 이동하지만, 플후드에서 충분히 배기 시켜주지 못하기 때문에 전반적인 환기시스템 효과는 저하된다. (Case 1, Case 3의 비교)

또, 푸쉬노즐의 분사속도가 같더라도, 급기량이 너무 적으면 푸쉬노즐에서 분사된 기류가 오염물질의 플후드까지 충분히 밀어주지 못하기 때문에 오염물질 제어효과가 저하된다. (Case 2, Case 3의 비교)

푸쉬-플 후드의 CFD-ACE 수치해석결과는 Heinsohn이 실시한 수치해석결과와 매우 잘 일치하였고, Case 3이 오염물질 배기효과가 가장 우수한 것으로 예측되었다. Case 1 및 Case 3과 거의 비슷한 경계조건으로 실시한 조(1995)의 수치해석결과에서도 Case 3의 효과가 Case 1보다 우수하였다.

푸쉬-풀 후드에 대한 수치해석결과는 비교모델로 사용된 Heinsohn의 수치해석결과와 매우 일치한 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과로 미루어 전산유체가 푸쉬노즐에 의해 분사되는 분류(Jet)의 기류를 충분히 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구는 유기용제 사용작업장중 특히 도료제조업체를 중심으로, 작업환경실태조사 및 국소배기후드에 대한 실험결과와 수치해석결과에 대한 비교연구를 통하여, 이를 현장에 활용할 수 있도록 작업환경관리방안 제시 및 후드설계시 수치해석방법의 적용방안을 강구하고자 실시하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

1. 작업환경 실태조사 결과

1) 우리나라 도료제조업체 6개소에 대한 작업환경측정결과 유기용제의 평균 노출수준은 물질별로 차이는 있으나, 노출기준의 1/10배 정도로 낮은 것으로 평가되었다. 방향족화합물은 노출농도로 볼 때 전체노출 유기용제의 60~90%를 점유하며, 도료제조업체의 대표적인 물질이라 할 수 있다.

2) 사업장별 노출수준은 Toluene 0.46~15.94 ppm, Ethylbenzene 0.22~1.81 ppm, Xylene 1.31~5.45 ppm이었다. 사업장의 평균 노출수준은 낮다고 할 수 있으나 일부 작업자의 경우는 노출기준을 초과하는 경우도 있다. 거의 대부분의 시료에서 검출되었고 전체노출 유기용제중에 가장 높은 노출수준을 보인 Toluene의 경우, 조사대상 6개 업체중 가장 낮은 노출수준인 업체는 SH사로 노출평균 0.46 ppm(0.10~3.0ppm), 가장 높은 노출수준인 업체는 IS사로 15.94 ppm(7.15~86.36 ppm)이었다.

3) 측정결과에서 알 수 있듯이, SH사의 노출수준은 다른 업체에 비해 낮았는데, 동 업체의 경우 타 업체에 비해 비교적 공정간 구별이 뚜렷하고 공간적 여유가 있는 업체이었다. 또한 원료투입구의 밀폐정도가 우수하며, 연화 및 조정공정 등에서 사용하는 용기의 크기에 맞게 후드크기의 조절이 가능한 국소배기시설이 설치되어 있고, 포장작업시 국소배기가 가능하도록 이동식 국소배기장치가 설치되어 있었다.

4) 도료제조공정은 크게 배합(원료투입), 연화(밀링, 샌딩, 롤링 등), 조정(조색, 회석), 포장, 수지제조공정으로 나눌 수 있으며, 업체에 따라 신너제조공정이 있다. 노출수준으로 전체노출 유기용제의 60~90%를 점유하는 방향족 화합물에 대한 공정별 노출수준을 비교 평가하여 보았다.

(1) 가장 낮은 노출수준을 보인 공정은 수지공정이며, 노출평균이 1 ppm을 초과하는 물질은 없었다. 수지공정은 주로 대규모업체에서 보유하고 있으며, 자동화공정으로 작업자의 노출수준은 낮은 것으로 평가되었다.

(2) 기타 공정의 노출평균은 Toluene 5.66 ± 1.55 ppm, Ethylbenzene 0.97 ± 1.51 ppm, Xylene 2.87 ± 1.64 ppm이며 공정간 노출수준의 큰 차이가 없었다.

이는 대부분의 업체가 유사한 물질을 사용하고 있으며, 공정간 구분이 명확하지 않고 작업자가 여러 작업을 병행하고 있기 때문으로 판단된다. 특히 일부 중소규모업체의 경우 하나의 공간에 모든 제조공정이 혼재되어 있고, 작업자 또한 동시에 여러 작업을 수행하고 있었다. 이렇게 전반적으로 유기용제의 노출수준이 공정간에 큰 차이가 없는 것이 도료제조업체의 특징이라 할 수 있다.

5) 도료제조업체에서 주로 사용되는 유기용제의 종류에 따라 작업자의 노출수준을 비교해 본 결과 Toluene, Xylene, Ethylbenzene 등 방향족 화합물과 MEK, MIBK 등 케톤계 화합물, Butyl Acetate, Ethyl Acetate 등 아세테이트계 화합물로 크게 나눌 수 있었다. Toluene, Xylene, Ethylbenzene의 경우 대부분의 시료에서 검출되었고, 검출량은 전체 노출 유기용제의 약 60%를 점유하는 것으로 평가되었다. MEK, MIBK는 60~85%의 시료에서 검출되었으며, 검출량은 전체 노출 유기용제의 약 20%이었다. Butyl Acetate와 Ethyl Acetate는 60~70%의 시료에서 검출되었으며, 검출량은 전체 노출 유기용제의 약 15%이었다.

6) 중소규모보다는 대규모업체가 비교적 낮은 농도로 노출되는 것으로 나타났다. 시설의 노후상태, 자동화수준의 차이로 노출수준에 차이가 있는 것은 당연하나 도료제조업체의 경우는 작업공정의 공간배치와 공간크기에 많은 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉, 대규모업체의 경우 공정간 총별로 구분가능한 반면, 중소규모업체는 공정간 구분이 뚜렷하지 않으며 작업공간이 좁고 작업자의 작업내용 또한 구분이 어렵다. 따라서 중소규모업체의 경우 어느 한 곳에서 노출시 작업장

전체로 확산되어 작업자 대부분이 비슷한 농도의 유해물질에 노출된다.

7) 도료제조업체의 경우 대부분 단일 공정체제를 갖추기가 어렵다. 즉 자동화할 수 있는 부분이 적다는 것인 데, 이는 도료제품 특성상 수요자의 요구에 따라 각양각색의 제품을 생산해야 하기 때문이다. 따라서 하루에도 수 차례 제품의 구성성분을 조절해야 하고 각종 용기의 세척작업이 수반된다. 이러한 다품종소량생산체제는 업체규모에 따라 다소 차이가 있기는 하나 대부분의 도료제조업체의 특징이라 할 수 있다.

8) 도료제조업체에서 사용하고 있는 단일 유기용제 및 구성성분 확인이 가능한 일반 신너 이외에 도료제조업체에서 공통적으로 사용하고 있는 혼합유기용제 제품에 대해 GC-MSD로 분석결과, 여러 업체에서 공통적으로 사용되는 혼합물질을 발견할 수 있었으며, 이들은 모두 업체마다 고유번호를 부여하여 관리하고 있었다. 이러한 물질의 특징은 일반적으로 알려져 있는 물질에 비해 b.p가 높으며 매우 많은 이성질체가 혼합되어 있다. 따라서 작업환경측정 대상에서 제외되고 있는 물질이었다.

9) 조사대상 6개소의 시료채취 작업자를 대상으로 호흡보호구 착용상태에 대한 조사결과 전체 70명중 17명만이 호흡보호구를 착용하고 있었다. 관리자와 상담결과, 대부분의 업체에서 호흡보호구를 지급하고 있다고 하나 실제 착용률은 24.3%로, 전반적으로 보호구 착용에 대한 인식수준이 낮은 것으로 조사되었다.

10) 보건관리자에 의해 일반적인 보건교육은 실시되고 있으나 취급현황을 볼 때 전반적으로 취급물질에 대한 정확한 정보 및 유해성에 대한 인식이 낮으며, 특히 유기용제의 경우는 제품번호로 취급되고 있어 일부 작업자의 경우 제품번호와 동제품의 정확한 명칭 및 유해성에 관해 알지 못하였다. 또한 취급물질에 대한 MSDS는 확보하고 있으나, 작업자들이 실제로 취급하는 설비 주변이나 휴게실에 유해물질의 고유번호에 따른 물질명, 취급방법 등에 관한 자료를 요약하여 게시할 필요성이 있다.

2. 도료제조업체의 화학물질 관리방안

가. 사업장 규모, 공간배치, 작업구분에 따른 검토

조사결과 공간적 여유가 있는 업체의 경우 노출수준이 낮았으며, 공정간 구분과 작업자의 작업내용 또한 구분이 필요한 것으로 판단된다. 소규모업체의 경우는 공간적 여유와 작업자수가 제한적이므로 가능한 한 환기시설 도입이 필요한 것으로 판단된다. 업체 사정상 환기시설 도입이 어려운 경우에는 수시로 작업장 내 공기를 순환시켜 주어야 한다.

나. 신너 구입전 MSDS 조사 및 성분검색 필요

1) 조사결과 유기용제의 노출수준은 전반적으로 낮은 편이나, 조혈 및 생식기계 장애물질로 알려진 벤젠과 2-Ethoxyethyl Acetate가 검출되었다.

2) 상기 물질은 모든 조사대상업체 및 공정에서 검출되지는 않은 것으로 볼 때 업체에서 사용하는 신너에 따라 노출수준에 차이가 있는 것으로 판단된다.

3) 따라서, 이러한 문제점은 신너의 신중한 선택과 물질대체 등의 관리적 측면에서 보완될 수 있으리라 판단된다.

다. 유기용제 노출감소 대책

1) 연화 및 조정공정 작업자의 경우 작업공간 내에서 수시로 용기 세척작업을 하고 있어 유기용제가 작업장 전체로 확산되고 있다. 따라서, 용기 세척작업시 환기시설이 설치되어 있는 공간이 필요하다.

2) 주문에 따라 생산제품을 수시로 바꾸어야 하는 도료제조 특성상 용기 세척작업과 이동이 많은데, 이동시 반드시 뚜껑을 덮어야 한다. 일부 업체의 경우 비닐덮개나 나무 및 PVC 덮개를 효과적으로 사용하고 있었다.

3) 업체별 유기용제 노출수준의 비교평가 결과, 일부 업체의 경우는 작업공정의 노출저감을 위한 기계설비 및 환기설비가 우수하고 노출수준 또한 낮은 것으로 평가되었다. 비교평가 결과 노출수준이 낮았던 공정은

(1) 원료투입구의 밀폐정도가 우수하였다. 동 업체의 경우 다른 업체보다 원료투입구의 밀폐상태가 양호한 데, 이는 작업자의 인식수준이 높다고 보다는

투입용기 자체의 설계가 양호하기 때문이다. 즉 투입구 뚜껑에 경첩을 달아 개폐가 용이하게 설계되고, 이와 함께 국소배기시설을 설치하였기 때문으로 판단된다.

(2) 대부분의 도료제조업체의 연화 및 조정공정 등에서 다양한 크기의 용기를 사용하고 있는 데, 일부 업체의 경우 용기의 크기에 맞게 후드크기의 조절이 가능한 국소배기시설이 설치되어 있었다.

(3) 도료 포장공정의 경우, 제한된 공정에서 다양한 제품을 포장하는 관계로 국소배기시설없이 작업하는 경우가 많아 도료제조업체에서 비교적 노출수준이 높은 공정이다. 일부 업체의 경우 Flexible 덕트를 설치하여 이동식 국소배기가 가능하도록 되어 있었다.

라. 작업자의 안전보건 인식수준 향상

1) 대부분의 업체에서 호흡보호구를 지급하고 있으나, 작업자들의 실제 착용율은 24.3 %로 매우 저조하며,

2) 보건관리자에 의해 일반적인 보건교육은 실시되고 있으나 유해물질의 취급 현황을 볼 때 전반적으로 취급물질에 대한 정확한 정보 및 유해성에 대한 인식이 낮았다.

3) 따라서, 보호구착用に 대한 철저한 관리와 함께 작업자가 유해물질을 취급하는 설비 주변이나 휴게실에 유해물질의 고유번호별 물질명, 취급방법 등에 관한 자료를 요약, 게시할 필요성이 있다.

3. 실험결과와 수치해석결과 비교·평가

본 연구는 상용 전산유체 프로그램인 CFD-ACE를 이용한 수치해석법으로 후드입구 유체유동을 예측한 다음, 결과 검증을 통해 산업환기분야에 적용가능성을 알아보기 위한 것이다. 수치해석을 통해 국소배기시설의 설계인자를 찾아낼 수 있다면, 많은 특수 형태의 후드설계시 적용가능하므로 시간과 비용면에서 매우 효과적인 방법이라 하겠다.

수치해석의 후드입구 유동장 해석능력을 비교평가하기 위해 원통형 후드, 정방형 후드 그리고 푸쉬-풀 후드를 모델로 설정하였다. 실험결과와 해석해 그리고 다른 수치해석결과를 이용하여 수치해석결과와 비교평가한 결과는 아래와 같다.

가. 원통형 후드 (Circular opening)

1) 플랜지 유무에 관계없이 2차원 축대칭 모델에 의한 원통형 후드에 대한 수치해석의 예측능력은 뛰어났다.

2) 플랜지가 없는 원통형 후드의 경우 LDA 측정결과와 차이가 1.6% 정도에 불과한 매우 뛰어난 예측능력을 가진 것으로 나타났다. 또 해석해와의 비교에서도 거의 일치한 값을 얻었다.

나. 정방형 후드 (Square opening)

1) 3차원 모델을 이용한 정방형 후드에 대한 유동 예측능력은 실험결과와 비교했을 때 원통형 모델보다는 약간 많은 차이를 나타냈지만, 만족할만한 결과를 나타냈다.

2) 플랜지가 없는 정방형 후드의 경우 실험결과와 비교했을 때 후드입구 영역에서 실험결과보다 약간 높게 예측됐지만, 거리가 멀어질수록 매우 잘 일치된 값을 보였다.

3) 플랜지부착 정방형 후드에서는 실험결과보다 수치해석에 의한 결과가 약간 낮은 값을 나타냈지만, 큰 차이는 발견할 수 없었다. 특히 해석해와 비교했을 때 평균 2.4% 정도의 차이밖에 보이지 않아 3차원 정방형 후드에 대한 유체유동의

예측능력도 충분한 것으로 나타났다.

다. Push-Pull Hood

분류(jet)에 대한 예측능력을 평가하기 위해 2차원 푸쉬-풀 후드에 대한 수치 해석을 실시하였다. 예측결과 급배기 유량 및 유속변화는 푸쉬-풀 후드의 효과에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났고, Heinsohn(1991)과 조(1995)의 연구결과와도 매우 비슷한 결과를 예측해 냈다.

1) 수치해석결과 같은 유량을 급배기 시키더라도 급기구 유속이 너무 강하면 푸쉬 노즐의 기류에 의해 노즐 주위의 공기가 풀후드 쪽으로 많이 이동하지만, 풀후드에서 충분히 배기하지 못하기 때문에 전반적인 환기시스템 효과는 저하된다. (Case 1, Case 3의 비교)

2) 푸쉬노즐의 분사속도가 같더라도, 급기량이 너무 적으면 푸쉬노즐에서 분사된 기류가 오염물질의 풀후드까지 충분히 밀어주지 못하기 때문에 오염물질 제어 효과가 저하된다. (Case 2, Case 3의 비교)

이상의 결과비교를 종합해 보면, 전산유체를 이용한 수치해석결과 매우 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 본 연구에서는 등온장으로 가정하였고, 기류변화에 따른 오염물질 농도예측을 하지 못했다. 향후 연구에서는 온도분포에 따른 기류변화와 기류변화에 따른 오염물질 농도분포 예측에 관한 연구가 필요하다.

V. 참고문헌

- 1) 광공업통계조사보고서(1989년) : 통계청, 1991
- 2) 김복순 : 열유체 수치해석에 의한 환경/에너지 시스템 고도 설계 연구 : 폐유 소각로, 열저장조, 원통형 후드, 충남대학교 석사논문, 1996
- 3) 김태형, 진명국, 이인섭 : VSDS(Ventilation System Design Software)의 개발, 한국산업위생학회지 7(2), pp.133~151, 1997
- 4) 김태형, 하현철 : Lagrangian Numerical Prediction of Contaminant Concentration around Obstacles, 대한대기보전학회 제13권, 제E호, 1997
- 5) 김현식 : 외부식 다단형 슬로트후드의 효율향상에 관한 연구, 서울대학교 보건대학원 석사학위 논문, 1993
- 6) 명현국 : 수치유체공학, 도서출판 한미, 1995
- 7) 심광진 : 정방형개구의 테이퍼후드에 있어서 관내의 압력손실특성에 관한 연구, 연세대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1995
- 8) 尹明熙, 金楨紘, 李相鎬, 姜峻遠 : 후드의 充滿效果 活用技法에 關한 研究, 한국산업위생학회지 1(1), 1991
- 9) 이재현 : 열전달 및 유체유동 수치해석, 대한교과서(주), 1997
- 10) 이정재 : CFD를 이용한 대공간 실내기류해석 및 적용사례, '98년도 건설환경부문 강연회, (사)공기조화냉동공학회, pp.5~18, 1998
- 11) 이정주 : 전체환기 모형실을 이용한 실내공기질 평가에 관한 연구, 서울시립대학교 대학원 박사논문, 1994
- 12) 조석호 : 푸시풀 환기장치에서의 난류유동과 오염농도의 평가, 지산전문대학 논문집 제13집, pp.271-283, 1995
- 13) 하현철, 김태형, 심광진 : 산업환기공학에 대한 전산유체역학의 응용가능성, 한국산업위생학회지 8(2), pp.163~167, 1998
- 14) 한국산업안전공단 : 산업환기기술세미나 기술자료 위생 93-3-4, 1993
- 15) 한돈희 : 일부 탈지세척 및 도금공정 국소배기장치의 성능점검과 개선방안, 한국산업위생학회지 8(2), pp.175~185, 1998
- 16) A.C.G.I.H., Industrial Ventilation 22nd ed. : pp.3-6,9-5, 1995

- 17) A. Jansson : Modelling Air Flow-Fields Outside Local Exhaust Openings, Vent 88, pp.25~32, 1988
- 18) B. Fletcher : Centerline Velocity Characteristics of Rectangular Unflanged Hoods and Slots Under Suction, Ann. Occup. Hyg. 20 : pp.141~146, 1977
- 19) Ilpo Kulmala : Numerical calculation of air flow fields generated by exhaust opening, Am. Ind. Hyg. Ass. Vol. 37, No. 5, pp.451~467, 1993
- 20) Ilpo Kulmala : Numerical Calculation of An Air Flow Field Near An Unflanged Circular Exhaust Opening, Staub-Reinhaltung der Luft. Vol. 55, pp.131~135, 1995
- 21) Ilpo Kulmala : Numerical Simulation of Unflanged Rectangular Exhaust Openings, Am. Ind. Hyg. Ass. Vol. 56, pp.1099~1106, 1995
- 22) J. M. Dalla Valle : Velocity Characteristics of Hoods Under Suction, Air Conditioning : pp.370~375, 1932
- 23) L. Silverman : Centerline Velocity Characteristics of Round Openings Under Suction, J. Ind. Hyg. and Tox. 24 : pp.259~266, 1942
- 24) M. R. Flynn : The Potential Flow Solution For Air Flow Into A Flanged Circular Hood, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 46(6) pp.318~322, 1985
- 25) M. R. Flynn, C. T. Miller : Comparison of Models for Flow Through Flanged and Plain Circular Hoods, Ann, occup. Hyg., Vol.32, No.3, pp.373~384, 1988
- 26) M. R. Flynn, C. T. Miller : The Boundary Integral Equation Method (BIEM) for Modeling Local Exhaust Hood Flow Fields, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 50(5) pp.281~288, 1989
- 27) M. R. Flynn, C. T. Miller, M. L. Fitzgerald, D. K. George, K. N. Smith, K. D. Tum Sudem : The Simulation of Local Exhaust Ventilation Problems", Vent 88, pp.33~40, 1988
- 28) M. Robinson, D. B. Ingham : Numerical Modelling Of The Flow Pattern Induced By A Push-Pull Ventilation System" Ann. occup. Hyg., Vol. 40, No. 3, pp. 293~310, 1996

- 29) R. Braconnier, R. Regnier, F. Bonthoux : An Experimental and Numerical Study of the Capture of Pollutants over a Surface-Treating Tank Equipped with a Suction Slot, vent 91, pp. 95~105, 1991
- 30) R. J. Heinsohn : Industrial Ventilation: Engineering Principles, New York, John Wiley & Sons, 1991
- 31) R. P. Garrison, C. H. Park, Y. Wang : Finite Element Modeling for Velocity Characteristics of Local Exhaust Inlets, Vent 88, pp.15~24, 1988
- 32) R. P. Garrison : Centerline Velocity Gradients for Plain and Flanged Local Exhaust Inlets, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 42 : pp.739~746, 1981
- 33) 岩崎 毅(T. Iwasaki) : 圓形開口에 있어서 管內的 縮流現象 및 壓力損失特性, 作業環境 Vol. 10(4), pp.64~72, July 1989
- 34) 岩崎 毅(T. Iwasaki), J. Ojima, 堤 晉 : 正方形開口의 Taper Hood에 있어서 Throat 內的 縮流現象 및 壓力損失特性, 日本勞動衛生工學會 第33回 學會 講演草綠集 : pp.91~92, 1993
- 35) 岩崎 毅(T. Iwasaki), J. Ojima, 沈光鎮, 杉原健資 : 正方形開口의 Taper Hood에 있어서 Throat 內的 縮流現象 및 壓力損失特性, 日本勞動衛生工學會 第34回 學會 講演草綠集 : pp.63~64, 1994
- 36) 岩崎 毅(T. Iwasaki), J. Ojima, 沈光鎮 : 正方形開口의 Taper Hood에 있어서 Throat 內的 縮流現象 및 壓力損失特性, 日本勞動衛生工學會 第35回 學會 講演草綠集 : pp.73~74, 1995
- 37) 岩崎 毅(T. Iwasaki), J. Ojima, 沈光鎮, 管昭郎 : 正方形開口의 管內的 縮流現象 및 壓力損失特性, 日本勞動衛生工學會 第36回 學會 講演草綠集 : pp.35~36, 1996
- 38) 岩崎 毅(T. Iwasaki), J. Ojima, 柴田延幸, 沈光鎮, 工藤圭介 : 플랜지부착 正方形開口에 있어서 管內的 縮流現象 및 壓力損失特性, 日本勞動衛生工學會 第37回 學會 講演草綠集 : pp.69~70, 1997

국소배기장치 효율향상에 관한 연구

(연구원 99-39-109)

발 행 일 : 1999. 5

발 행 인 : 원 장 정호근

연구수행자 : 책임연구원 심광진

발 행 처 : 한국산업안전공단

산업안전보건연구원

주 소 : 인천광역시 부평구 구산동 34-6

전 화 : (032)5100-932

F A X : (032)518-0864

비매품